



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET**  
**DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ BOUIRA**

**FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES APPLIQUEE**  
**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

N° d'ordre : ...../master/2020.

Série : ...../GM/2020.

**MEMOIRE**

Présenté pour obtenir le diplôme de master  
en Génie Mécanique

**OPTION : Energétique**

**Valorisation de la ressource géothermale pour la production de l'électricité en utilisant  
les cycles organiques de Rankine**

Par : **BOUKRIF Chahinaz** Et **ZERROUKI Dalel**

Déposé le: .. / 11 /2020

Devant le jury composé de :

Président : M<sup>f</sup>.LAOUARI Azzedine  
Rapporteur : M<sup>f</sup>.ABERKANE Sofiane

Université Bouira  
Université Bouira

Examineurs :  
M<sup>f</sup>. BOURAGBI Lakhdar

Université Bouira



## **Remerciement**

*Avant tout, nous remercions Dieu tout puissant, de nous avoir accordé  
La force, le courage et les moyens pour la réalisation de ce travail*

*Notre gratitude s'adresse à Mr. ABERKANE Sofiane pour son encadrement  
son orientation, ses conseils et sa disponibilité pour nous permettre de*

*Mener à bien ce travail.*

*Nous remercions aussi aux membres de jury de nous avoir fait l'honneur  
de bien vouloir participer au jury de ce mémoire et pour toute l'attention qu'ils vont  
prêter à l'évaluation de notre travail*

*Nous tenons à remercier aussi tous les enseignants du département génie mécanique  
de l'université AÛli Mhend Oulhadj Bouira*

*Et enfin nous tenons à remercier toute personne qui nous a aidé ou  
encouragé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire*





**Dédicace**

*A mon père pour m'avoir insufflé l'abnégation*

*A ma chère mère pour sa précieuse attention a mon égard*

*A mes frères et mes sœurs*

*A tous ceux qui croient aux vertus du sacrifice, de l'effort et du travail*

**Delal**





***Dédicace***

***A ma famille et mes amies***



***Chakinoz***

## **Résumé**

Cette étude est portée sur la valorisation de la ressource géothermique pour le cas de la production d'électricité. En l'Algérie, le potentiel de la ressource géothermique est négligeable devant le potentiel solaire que regorge le pays. Toutefois la géothermie reste quand même une ressource fiable, non intermittente et pourrait être mieux exploitée et mieux valorisée en optant d'avantage pour des systèmes de cogénération répondant simultanément aux besoins des stations thermales mais également en produisant leur besoin électrique. C'est dans ce sens que l'Algérie a réservé une part de production d'électricité géothermale avoisinant les 15 MW dans son plan de développement des énergies renouvelables. Ce travail se focalise sur l'étude thermodynamique d'un cycle organique de Rankine avec et sans récupérateur de chaleur interne en utilisant les fluides de travail hydrocarbures qui sont le butane (R600), l'isobutane (R600a), le pentane (R601), l'isopentane (R601a) et l'hexane. Le système ORC est réalisé à l'aide du simulateur Aspen Hysys.

**Mots Clés:** Energie géothermique, Organiques Rankine Cycles, fluide de travail, ASPEN HYSYS

## **Abstract**

This study will focus on the valuation of the geothermal resource for the case of electricity production. in Algeria, the potential of the geothermal resource is negligible compared to the solar potential that abounds in the country. However, geothermal energy still remains a reliable, non-intermittent resource and could be better exploited and better valued by opting more for cogeneration systems that simultaneously meet the needs of spas but also by producing their electricity needs. It is in this sense that Algeria has reserved a share of geothermal electricity production of around 15 MW in its renewable energy development plan. This work focuses on the thermodynamic study of an organic Rankine cycle with and without internal heat exchanger using the hydrocarbon working fluids which are butane (R600), isobutane (R600a), pentane (R601), isopentane (R601a) and hexane. The ORC system is performed using the Aspen Hysys simulator.

**Keywords:** Geothermal energy, Organic Rankine Cycle, Working fluids, Aspen Hysys.

## ملخص

ستركز هذه الدراسة على تقييم موارد الطاقة الحرارية الأرضية في حالة إنتاج الكهرباء. في الجزائر ، فإن إمكانات موارد الطاقة الحرارية الأرضية لا تذكر مقارنة بالإمكانات الشمسية السائدة في البلاد. ومع ذلك ، لا تزال الطاقة الحرارية الأرضية موردًا موثوقًا به وغير متقطع ويمكن استغلاله بشكل أفضل وتقييمه بشكل أفضل من خلال اختيار المزيد من أنظمة التوليد المشترك التي تلبي في الوقت نفسه احتياجات المنتجعات الصحية ولكن أيضًا من خلال إنتاج احتياجاتها من الكهرباء. وبهذا المعنى ، احتفظت الجزائر بحصة من إنتاج الكهرباء الحرارية الأرضية بحوالي 15 ميجاوات في خطتها لتطوير الطاقة المتجددة. يركز هذا العمل على الدراسة الديناميكية الحرارية لدورة رانكين العضوية مع وبدون المنقح الحرارة الداخلية باستخدام السوائل العمل الهيدروكربونية التي هيالبيوتان (R600) والأيزوبيوتان (R600a) والبنتان (R601) والأيزوبنتان (R601a) والهكسان. تم تنفيذ نظام ORC باستخدام جهاز محاكاة Aspen Hysys.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة الحرارية , دورة رانكين العضوية،سوائل العمل، أسبن هاييسيس.

## TABLE DES MATIERES

Introduction générale.....	I
Chapitre I: L'énergie géothermique	
I.1 Introduction.....	1
I.2 La géothermie .....	1
I.3 Types de gisements géothermiques .....	2
I.3.1 La géothermie à haute énergie.....	3
I.3.2 La géothermie à basse énergie.....	4
I.3.3 La géothermie à très basse énergie.....	4
I.3.4 Géothermie HDR (roche chaude sèche).....	4
I.4 Les forages .....	5
I.4.1 Techniques de forage .....	5
I.4.2 Méthodes d'exploration.....	6
I.5 Les centrales géothermiques dans le monde.....	6
I.5.1 Impact sur l'environnement/climat .....	7
I.6 Le potentiel des ressources géothermales en Algérie .....	8
I.7 Conclusion .....	10
Chapitre II: Les Cycles Organiques de Rankine	
II.1 Introduction .....	12
II.3 Le cycle organique de Rankine .....	13
II.4 Principe de fonctionnement des ORC .....	13
II.5 Fluides organiques .....	14
II.6 Les différents systèmes ORC .....	16
II.6.1 Cycles ORC standards .....	16
II.6.2 Cycles ORC avec un échangeur de chaleur interne .....	17
II.6.3 Cycle ORC « régénératif » (ou avec sous-tirage) .....	18
II.7 Application des ORC.....	19
II.7.1 La biomasse .....	20
II.7.2 Énergie solaire .....	20
II.7.3 Energie géothermique .....	21
II.7.4 Récupération et valorisation des rejets thermiques industriels .....	21
II.8 Description du système thermodynamique étudié.....	21
II.9 Conclusion .....	25
Chapitre III: Simulation sur Aspen HYSYS	
III.1 Introduction .....	28
III.2 Définition de la simulation.....	28
III.3 Modes de fonctionnements des simulateurs.....	28

III.4 Utilisation de la simulation .....	28
III.5 Présentation du logiciel Aspen HYSYS .....	29
III.5.1 Définition du logiciel Aspen HYSYS .....	29
III.5.2 Les concepts de la base du simulateur HYSYS .....	29
III.5.3 Environnement de simulation .....	30
III.5.4 Les caractéristiques principales de HYSYS .....	31
III.5.5 Les modèles thermodynamiques sur HYSYS .....	32
III.5.6 Les étapes d'utilisation du logiciel HYSYS .....	32
III.6 Les étapes de simulation du système ORC étudié.....	32
III.7 Conclusion.....	45
<b>Chapitre IV: Résultats et interprétations</b>	
IV.1 Validation.....	47
IV.2 Température d'entrée en turbine .....	48
IV.3 Température de condensation .....	49
IV.4 Système ORC avec IHE.....	50
Conclusion générale .....	45
Référence.....	55

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1</b> : principales zones géothermiques en Algérie[7] .....	8
<b>Figure II 1:</b> Représentation schématique d'un cycle de Rankine .....	12
<b>Figure II 2:</b> schéma de principe du fonctionnement d'un cycle organique de Rankine .....	14
<b>Figure II 3</b> : liste de travail utilisable selon la température de la source chaude .....	15
<b>Figure II 4:</b> Diagramme T-S d'un fluide sec et d'un fluide humide .....	15
<b>Figure II 5:</b> Schéma du cycle ORC simple .....	17
<b>Figure II 6:</b> Diagramme T-S pour un cycle ORC simple sous-critique (a) et supercritique (b) .....	17
<b>Figure II 7:</b> Schéma du cycle ORC avec un échangeur interne (IHE) comme récupérateur ..	18
<b>Figure II 8:</b> Diagramme T-S avec un récupérateur sous-critique(a) et supercritique(b) .....	18
<b>Figure II 9:</b> Schéma d'un cycle ORC avec soutirage (a) et le diagramme T-S supercritique (b) du fluide de travail.....	19
<b>Figure II 10:</b> Répartition des sites ORC par secteur d'activité (a) en nombre (b) en puissance installée.....	20
<b>Figure II.11:</b> Schéma d'un ORC simple géothermique avec une tour de refroidissement.....	22
<b>Figure II.12:</b> Cycle thermodynamique pour le système ORC standard.....	22
<b>Figure III 1:</b> Schéma d'un système ORC simple étudié.....	33
<b>Figure III 2:</b> fenêtre d'ASPEN HYSYS v10 .....	33
<b>Figure III 3:</b> les différents composants de la simulation .....	34
<b>Figure III 4:</b> Liste de fluide package .....	34
<b>Figure III 5:</b> Fenêtre des conditions d'entrée d'eau géothermale .....	35
<b>Figure III 6:</b> Présentation de l'évaporateur .....	35
<b>Figure III 7:</b> Installation de l'évaporateur .....	36
<b>Figure III 8:</b> Fenêtre des conditions de l'évaporateur .....	37
<b>Figure III 9:</b> Fenêtre des paramètres de l'évaporateur .....	37
<b>Figure III 10:</b> Présentation de la turbine.....	38
<b>Figure III 11:</b> Installation de la turbine.....	38
<b>Figure III 12:</b> Paramètre de la turbine .....	39
<b>Figure III 13:</b> Présentation du condenseur.....	39
<b>Figure III 14:</b> Installation du condenseur .....	40
<b>Figure III 15:</b> Fenêtre des conditions du condenseur .....	41
<b>Figure III 16:</b> Fenêtre des paramètres du condenseur .....	41
<b>Figure III 17:</b> Présentation de la pompe .....	42
<b>Figure III 18:</b> Installation de la pompe .....	42
<b>Figure III 19:</b> Paramètre de la pompe.....	43
<b>Figure III 20:</b> Présentation du préchauffeur .....	43
<b>Figure III 21:</b> Installation du préchauffeur .....	44
<b>Figure III 22:</b> Paramètre du préchauffeur .....	44

<b>Figure IV.1 :</b> Puissance électrique nette générée à différentes températures du R-600 en entrée de turbine pour une source géothermale à 130°C et 150°C.....	47
<b>Figure IV.2:</b> Le profil de variation de puissance net de l'ORC en fonction de la température d'entrée dans la turbine avec $T_{G1}=150^{\circ}\text{C}$ et une température de condensation de 30°C.....	48
<b>Figure IV.3:</b> Le profil de variation de la puissance net du système ORC en fonction de température de condensation $T_3$ .....	49
<b>Figure IV.4 :</b> Schéma d'un (a) ORC avec IHE avec une tour de refroidissement (b) Cycle thermodynamique T-s.....	50

## **LISTE DES TABLEAUX**

<b>Tableau I.1:</b> caractéristiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie [6].....	9
<b>Tableau I.2:</b> Données physico-chimiques de quelques forages albiens du sud de l'Algérie[6].....	10
<b>Tableau II.1:</b> valeurs des paramètres fixés par Liu et al.....	23
<b>Tableau IV.1 :</b> résultats de la simulation d'un Système ORC standard à $T_{G1}= 110^{\circ}\text{C}$ .....	51
<b>Tableau IV.2 :</b> résultats de la simulation d'un Système ORC standard à $T_{G1}= 150^{\circ}\text{C}$ .....	51
<b>Tableau IV.3 :</b> résultats de la simulation d'un Système ORC avec IHE à $T_{G1}= 110^{\circ}\text{C}$ .....	51
<b>Tableau IV.4 :</b> résultats de la simulation d'un Système ORC avec IHE à $T_{G1}= 150^{\circ}\text{C}$ .....	51

# NOMENCLATURE

## Nomenclature général

**h** : Enthalpie (kJ/kg)

**m**: Débit massique (kg/s)

**T** : Température (°C)

**W**: Puissance (kW)

**η** : Rendement (%)

**Q** : Énergie (kJ)

**s** : entropie (kJ/kg K)

## Symboles Grecques

**η** : Rendement

**Δt** : différence de température

## Abréviations

**HDR** : la géothermie roche chaude sèche ou Hot Dry Rock

**CO<sub>2</sub>** : Dioxyde de carbone

**ANRH** : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

**ORC** :Organic Cycle Rankine (Cycle Organique de Rankine)

**IHE** :InternalHeatExchanger(échangeur de chaleur interne)

**FFH** :Feed-Fluidheater

**PDF** : diagramme du procédé ou Process Flow Diagram

## Indice et exposants

**is** : isentropique

**net** : puissance nette

**p** : pompe

**t** : Turbine

**m** : mécanique

**g** : générateur électrique

**E** :Evaporateur

**C** :Condenseur

**G** :Eau géothermale

**O** : fluide de travail organique

# **Introduction Générale**

# Introduction Générale

## Introduction générale

Une des grandes problématiques qui s'insère dans le contexte énergétique actuel est l'exploitation de sources de chaleur à basse température pour la production d'électricité. Une solution consiste à employer un fluide de travail dont les températures et pressions de changement d'état permettent la réalisation d'un cycle thermodynamique moteur alimenté par de l'eau dans les centrales thermiques plus classiques. On parle alors de Cycle Organique de Rankine (ORC). Les applications sont nombreuses, de la récupération des pertes de chaleur industrielles à la géothermie, en passant par le solaire. La présente étude se focalise cependant sur l'application de l'ORC à l'énergie thermique des eaux souterraines. Cette température peut être exploitée pour alimenter un cycle ORC basse température et produire de l'électricité. Il s'agit d'une énergie de base, renouvelable et non-fluctuante, ce qui constitue un atout majeur, notamment dans les milieux insulaires.

Les ORC (Organiques Rankine Cycles) sont des systèmes prometteurs pour la conversion de l'énergie géothermique à basse température en énergie électrique. Les performances thermodynamiques du système ORC sont analysées dans ce travail en utilisant différents fluides de travail hydrocarbures qui sont entraînés par l'eau géothermique à une température comprise entre 100 °C et 150 °C.

Cette étude est répartie sur quatre chapitres :

- **Le premier chapitre:** porte sur l'énergie géothermique, ces différents types et ces multiples applications et le potentiel des ressources géothermales en Algérie.
- **Le deuxième chapitre:** est exclusivement consacré au système « ORC ». Les éléments qui le composent, leurs utilités, les différents systèmes ORC et finalement la formulation détaillée du cas étudié.
- **Le troisième chapitre:** est orienté vers la présentation du logiciel Aspen HYSYS et son utilisation pour la simulation du système ORC étudié.
- **Le quatrième chapitre:** résume les plus importants résultats concernant les performances thermodynamiques du système ORC.

Le travail se termine par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

## I.1 Introduction

La géothermie est une partie de la géophysique qui s'intéresse à l'étude des phénomènes thermiques de la terre qui sont liés à la formation et à la composition du globe. Les ressources géothermiques dites de haute énergie se caractérisent par une température supérieure à 150 °C et sont principalement destinées à la production d'électricité. La géothermie de moyenne et de basse énergie se caractérise par une température comprise entre 30°C et 150°C et elle est destinée au chauffage des logements (60°C à 80°C), au chauffage de serres, la pisciculture, etc.

Une nouvelle technique en géothermie est mise au point depuis 1987 par Soultz sous Forêts, c'est la géothermie roche chaude sèche ou Hot Dry Rock (HDR). La technique consiste à injecter de l'eau froide en profondeur dans des puits et à la pomper vers la surface par d'autres puits après que son transfert à travers le réseau des fractures du sous-sol l'ait portée à haute température. [1]

## I.2 La géothermie

La géothermie, du grec **géo** (la terre) et **thermos** (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la terre qui est convertie en chaleur.

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre.

Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité.

L'énergie géothermique est localement exploitée pour chauffer ou disposer d'eau chaude depuis des millénaires, par exemple : en Chine, dans la Rome antique et dans le bassin méditerranéen. [2]

La chaleur terrestre qui se propage à travers la croûte continentale (appelé flux de chaleur) n'est pas homogène; le flux de chaleur varie donc d'un endroit à un autre.

En présence d'un flux de chaleur élevé, les eaux souterraines se réchauffent et se transforment en eau thermale. Les eaux deviennent chaudes et remontent en surface sous différentes formes. Ces formes peuvent être [3]:

- **Geysers** : Dans les pays volcaniques, l'eau bouillante jaillit à la surface sous forme de jets atteignant jusqu'à 50 m de haut. Exemple : Les geysers d'Islande, de Nouvelle-Zélande ou de Californie ;
- **Fumerolles** : Ce sont des fentes à partir desquelles des gaz volcaniques, la plupart du temps vapeur d'eau, s'échappent vers l'atmosphère. Exemple: Fumerolles en Italie à Larderello ;
- **Sources thermales** : Ce sont des émanations d'eau, de vapeur d'eau et d'anhydride carbonique à température élevée. Elles doivent leur origine à des émanations de vapeur d'eau provenant de zones profondes qui, lorsqu'elles atteignent les couches superficielles, se refroidissent et se condensent, donnant naissance à des eaux de températures très élevées. Exemple: Les sources thermales du Nord de l'Algérie.

### I.3 Types de gisements géothermiques

En matière de gisement géothermique, on distingue trois types de géothermie : la haute, la basse et la très basse énergie. Les sites géothermiques à haute et moyenne température permettent la production d'électricité moyennant de turbines. Tandis que la production de chaleur est obtenue à partir des sites géothermiques de basse (utilisation des nappes d'eau chaude du sous-sol profond) et très basse température (utilisation de pompe à chaleur).

La géothermie est certainement la filière qui présente le plus large spectre d'activités : production de chaleur, production d'électricité, production de chaleur sur réseau, production de chaleur individuelle. Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent), ni même de la disponibilité d'un substrat, comme c'est le cas de la biomasse. C'est donc une énergie fiable et stable dans le temps. Bien que l'énergie prélevée soit gratuite, le coût des systèmes géothermiques reste relativement élevé (du fait du système de captage généralement).

En Europe, la géothermie est la troisième source d'énergie renouvelable derrière l'hydraulique et la biomasse. Elle est davantage utilisée pour produire de la chaleur que de l'électricité ; dans notre cas à la production de l'énergie électrique.

A travers le monde, il existe trois catégories de gisements géothermiques [3]:

- **Les gisements géothermiques des zones volcaniques récentes** : Ce type de gisement se caractérise par l'existence en profondeur d'une chambre magmatique très chaude (1300°C) qui représente la source de chaleur naturelle. Cette chambre magmatique cède sa chaleur aux couches géologiques superficielles. Dans ce cas, les eaux sont très chaudes; elles

sont plus adaptées à la production d'électricité. Parmi les pays concernés par ce type de gisements, on peut nommer la Nouvelle-Zélande et l'Islande

- **Les gisements des zones de plate-forme continentales stables, recouvertes de terrains sédimentaires** : Dans ce type de gisement il n'existe pas de source de chaleur particulière en profondeur, mais la chaleur est uniquement due au gradient géothermique. Dans ce cas les réserves sont généralement très profondes et leur exploitation nécessite la réalisation de forages. Ce type de gisements est rencontré en France (les bassins parisien et aquitain) et en Algérie (le bassin du Sahara septentrional.)

- **Les gisements géothermiques des zones continentales actives** : Dans ce troisième cas, les eaux résultent de la circulation d'eau thermique à travers les failles et les discontinuités géologiques et arrivent en surface sous forme de sources.

On retrouve ce type de gisement en Algérie, à travers les diverses sources thermales qui jaillissent au Nord. Exemple : Hammam Bou adjar.

Suivant leurs thermalismes, ces gisements géothermiques sont classés en deux types de champs géothermiques :

- **Les champs hyperthermiques** : Concernent la première catégorie de gisements correspondants aux gisements géothermiques des zones volcaniques récentes.

- **Les champs semi-thermiques** : Concernent la deuxième et la troisième catégorie de gisements correspondant aux gisements des zones de plate-forme continentales stables, recouvertes de terrains sédimentaires et aux gisements géothermiques des zones continentales actives.

### I.3.1 La géothermie à haute énergie

La géothermie haute énergie, exploite les gisements de vapeur sèche ou humide (mélange eau et vapeur). Ces gisements se caractérisent par des températures supérieures à 150°C.

On rencontre cette géothermie à haute énergie dans les régions volcaniques et sismiques (frontières de plaques) où le gradient géothermique est particulièrement élevé.

La géothermie haute énergie est destinée principalement à la production d'électricité. La vapeur, qui est puisée dans le réservoir géothermique, est déchargée dans une turbine, reliée à un alternateur pour la production d'électricité.

La vapeur sèche est directement utilisée alors que la vapeur humide qui est plus fréquente nécessite l'utilisation d'un séparateur.

Un exemple de ce type de géothermie est donné par la centrale de Bouillante à Guadeloupe (France). [4]

### I.3.2 La géothermie à basse énergie

La géothermie basse énergie se caractérise par une température comprise entre 30°C et 150° C, elle est rencontrée à une profondeur moyenne de 1000 à 2500 m, dans les formations perméables remplies d'eau situées principalement dans les bassins sédimentaires de grandes dimensions. Elle est destinée principalement au chauffage urbain et au chauffage de serres.[4]

### I.3.3 La géothermie à très basse énergie

La géothermie à très basse énergie est rencontrée à de faibles profondeurs (nappes phréatiques) ou la température est de l'ordre de 10 à 30°C. Elle est utilisée entre autre pour la pisciculture, l'horticulture et le séchage de produits agricoles.[4]

### I.3.4 Géothermie HDR (roche chaude sèche)

Une autre technique géothermique qui a été mise au point, c'est la géothermie roche chaude sèche ou Hot Dry Rock. La technique consiste d'abord à prospector les sites géothermiques favorables qui sont les sites renfermant des roches sèches en profondeur (moins de 6 km), tels que les granites. De l'eau froide sous forte pression est injectée par la suite en profondeur dans des puits ou forages d'injection. L'eau élargit les fissures dans les massifs rocheux. Elle acquiert ainsi une forte quantité de chaleur, puis elle remonte en surface par un forage de production. Avant de réinjecter cette eau dans le forage, ses calories sont récupérées et exploitées au niveau d'une centrale géothermique. Le circuit ainsi formé peut produire une importante quantité d'énergie géothermique.

vingt-cinq ans, plusieurs projets de recherches sont menés dans ce domaine surtout aux Etats-Unis, au Japon et en Europe. Parmi ces projets, celui de l'union européenne, il est destiné à la création de centrales géothermiques. Cependant d'autres progrès dans l'exploitation restent à accomplir pour maîtriser ce type de gisement qui peut représenter l'essentiel du potentiel géothermique dans le monde compte tenu du fait de la grande répartition de roches chaudes en profondeur. [4]

## I.4 Les forages

L'exploitation de la géothermie nécessite l'existence en profondeur de la terre de deux paramètres importants la chaleur et l'eau. En effet c'est l'eau qui permet de véhiculer cette chaleur profonde en surface.

L'eau contenue dans les réservoirs géothermiques est remontée à la surface grâce à un forage; le plus fréquent est le forage Rotary.

Si la pression dans le gisement est insuffisante pour que le forage soit artésien, la production peut s'établir par l'intermédiaire d'une pompe. Une fois l'eau géothermale est utilisée, elle est soit rejetée dans l'environnement si l'eau n'est pas salée. Dans le cas contraire, elle est réinjectée dans la nappe d'origine à l'aide de puits de réinjection. Le forage rotary nécessite l'emploi d'un fluide de forage préparé sur le chantier. Dans le cas de la circulation directe, le fluide est injecté en continu sous pression dans les tiges creuses de la ligne de sonde, il sort par les événements de l'outil et remonte à la surface dans l'espace annulaire (entre les tiges et les parois du trou).

La profondeur du forage peut être très importante, pendant l'exécution de celui-ci, il n'y a pas de perturbation par les terrains peu stables ou plastiques, sous réserve de l'utilisation d'un fluide de forage adapté.

Ce système permet un bon contrôle des paramètres de forage (poids de l'outil, vitesse de rotation, qualité de la boue, débit d'injection de la boue) en fonction des terrains à traverser.

- Le forage rotary entraîne une consolidation des parois en terrains meubles par dépôt d'un cake. [3]

### I.4.1 Techniques de forage

La profondeur ciblée pour une exploitation efficace de la géothermie profonde se situe à environ 4 à 5 km, ce qui correspond à des températures de 120°C à plus de 160°C. Avec une centrale à système «flash» par exemple, la production d'électricité à partir de l'eau captée à une telle profondeur pourrait atteindre un taux d'efficacité électrique «raisonnable», supérieur à 15%.

Les techniques de forage actuelles permettent d'aller jusqu'à 7 ou 10 km de profondeur. Etant donné que les coûts de forage augmentent non pas de façon linéaire, mais exponentielle en fonction de la profondeur, il existe également une limite économique qui s'établit aujourd'hui à 5 km environ. Les nouvelles avancées, également prometteuses pour l'exploration géothermique, proviennent essentiellement de l'industrie du pétrole et du gaz, avec par exemple l'automatisation du procédé de forage ou la technique de forage horizontal,

qui a notamment été perfectionnée ces dernières années pour l'exploitation des gisements de gaz de schiste. Cependant, l'expérience de l'industrie pétrolière et gazière se limite surtout au forage dans les couches sédimentaires, et ne contribue que de manière limitée au développement de systèmes pétro-thermaux visant les roches cristallines. Des techniques de forage considérées aujourd'hui comme originales, telles que la perforation «par fusion de la roche» développée notamment par l'ETH Zurich, laissent envisager à long terme une diminution considérable des coûts de forage.[3]

### I.4.2 Méthodes d'exploration

Lors du choix du site, il est indispensable de réaliser des études géophysiques afin de réduire les risques d'échec, en particulier pour les projets hydrothermaux. Les couches sédimentaires peuvent être modélisées à l'aide de méthodes sismiques consistant à envoyer des ondes sonores dans le sous-sol et à analyser les échos dans chacune des couches traversées. Cela permet d'obtenir un profil des couches sédimentaires le long d'une ligne (sismique 2D). De nouvelles technologies 3D permettent d'améliorer considérablement la modélisation, notamment lorsqu'elles peuvent être calibrées avec les vraies données de forage. La sismique 3D a été par exemple utilisée à l'hiver 2009/2010 pour le choix du site du projet hydrothermal à Saint-Gall. Si ces méthodes n'ont pas permis de trouver de l'eau, il a cependant été possible de mettre en évidence la présence de zones de failles pouvant présenter une perméabilité élevée.

Dans la perspective du développement des systèmes pétro-thermaux, il est particulièrement important d'enregistrer en continu les petites vibrations qui se produisent lors de la phase de stimulation. Les mesures réalisées à Bâle ont permis de fournir des informations précieuses sur les relations entre la pression injectée, la vitesse d'écoulement, les vibrations sismiques et les fissures consécutives. Ces données sont utilisées encore aujourd'hui par des universités du monde entier, dont l'ETH Zurich, afin de mieux comprendre le processus de stimulation et de mettre au point de nouveaux concepts de gestion des risques. [3]

### I.5 Les centrales géothermiques dans le monde

Les principales centrales utilisant l'énergie géothermique sont des centrales à cycle binaire comme c'est le cas dans les pays suivants [5]

- **Mexique** : Une centrale géothermique à cycle binaire (cycle de Rankine) d'une capacité de 8 MWe a été conçue dans la région de Sao Miguel, une autre centrale de 62 kW est installée à Los Azufres.
- **Islande** : L'exploitation d'un fluide géothermal à 120 °C permet le fonctionnement d'une centrale à cycle binaire (cycle Kalina) d'une capacité de 2 MWe.
- **Allemagne** : Une centrale binaire exploitant le réservoir géothermique de 100 à 130 °C est construite dans la ville allemande de Neustadt-Glewe d'une capacité de 250 kW.
- **Autriche** : Dans la région d'Altheim, une installation géothermique type Rankine exploite les ressources géothermiques de 100 °C à 2000 m de profondeur.
- **Etats Unis** : A l'île d'Hawaï, une centrale géothermique à cycle binaire avec une puissance de 30MWe se trouve dans la région de Puna

Trois autres projets de centrales géothermiques à fluide binaire sont réalisées au Nevada et au Nouveau Mexique.

- **France** : La centrale de Bouillante à l'île de France a été construite en 1984 en Guadeloupe. Cette centrale à cycle binaire d'une capacité de 5 MWe permet l'utilisation de la géothermie haute énergie pour la production d'électricité.

### I.5.1 Impact sur l'environnement/climat

Les centrales électriques géothermiques sont considérées comme rejetant peu de CO<sub>2</sub>. Sur l'ensemble de leur durée de vie, elles émettent en moyenne dans le monde quelque 120 grammes d'équivalent CO<sub>2</sub> par kWh. La géothermie est donc une technologie «propre et sûre».

Les installations géothermiques se prêtent à une exploitation décentralisée (environ 5 MWe).

Elles peuvent donc être placées à l'intérieur ou à proximité de zones urbaines, ce qui joue un rôle majeur pour une utilisation efficace de la chaleur. Sur les sites où les conditions géologiques sont réunies, il devrait également être possible à l'avenir d'augmenter la capacité des centrales: plusieurs forages percés dans différentes directions pourraient être exploités sur un même site.

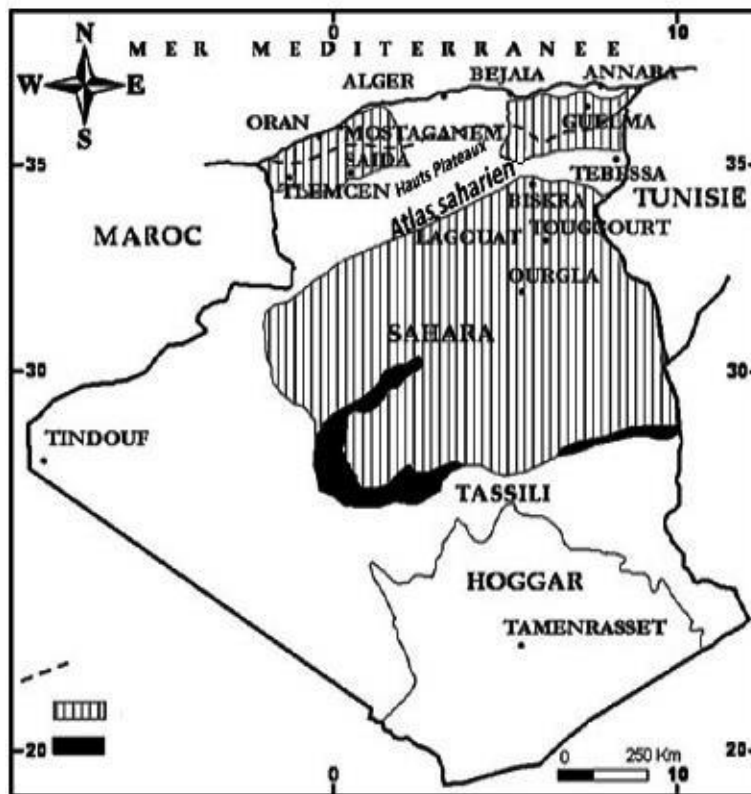
En raison des séismes de faible intensité qui se sont produits à Bâle, à Saint-Gall, mais aussi à

Landau en Allemagne, tous provoqués par les forages profonds et par les travaux qu'ils impliquent, la géothermie fait l'objet d'un débat public. Il importera à l'avenir d'évaluer, correctement le risque sismique et de comparer les conséquences des microséismes aux avantages de la géothermie. [3]

**I.6 Le potentiel des ressources géothermales en Algérie**

L'Algérie contient des réserves d'eau thermale importantes qui se manifestent en surface par les nombreuses sources thermale au Nord et aussi par les forages artésiens qui captent la nappe de l'Albien au Sud. La cartographie et la caractérisation des ressources géothermiques de l'Algérie est réalisée à partir des données recueillies auprès d'organismes nationaux (Sonatrach/Exp, ANRH) et dans les rapports techniques. [6]

De ces données, il apparaît que les régions les plus prometteuses se situent au Nord-Est et au Nord-Ouest de l'Algérie et dans le bassin sédimentaire du Sahara septentrional comme illustré dans la figure I 1.



**Figure I.1 :** principales zones géothermiques en Algérie[7]

Des études en géothermie ont été menées principalement sur le Nord algérien [1,6-9]. Ces études montrent que le Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermale. En effet, plus de 282 sources thermale ont été inventoriées par l'Agence Nationale des

Ressources Hydrauliques (ANRH). Elles sont réparties sur 24 wilayas avec une plus forte concentration au Nord-est du pays.

Le Nord de l'Algérie renferme de nombreuses sources thermales classées de basse à moyenne température et réparties d'Est en Ouest. Comme le montre le tableau I.1, les températures mesurées à l'émergence des varient de 22 °C à 98 °C. La plus renommée de ces sources est celle de Hammam Meskhoutine de Guelma qui est surtout connue pour être classée la source thermale la plus chaude en Algérie (98 °C).

L'exploration géothermique s'intéresse essentiellement à définir et à classer, la source de chaleur, le réservoir géothermique et le fluide géothermique.

Source	wilaya	Tem ps (°C)	Residus sec (mg/l)	Debit(l/s)	Faciès chimique
Hm.Ouled Aisha	Batna	35	7143	4	Chloruré-sodique
Hm.Sillel	Bejaia	46	2221	10	Chloruré-sodique
Hm. Chegun	Biskra	50	6210	20	Chloruré-sodique
Hm. Boughrara	Tlemcen	43	398	6,5	Chloruré-magnésien
Hm. Charef	Djelfa	42	1670	38	Chloruré-calcique
Hm. Sokhna	Sétif	50	2052	-	Sulfaté-sodique
Hm. Sidi Aisa	Saida	44,5	2505	5	Sulfaté-sodique
Hm. Salah Bey	Constantine	23	25582	-	Sulfaté-sodique
Hm. Touansa	Médéa	22	8970	5	Chloruré-sodique
Hm. Delaa	M'sila	42	1980	25	sulfaté-sodique
Hm. Bouhanifia	Mascara	66	2012	23	Chloruré-sodique
Hm. Ain Franime	Oran	35	5343	-	Chloruré-sodique
Hm. Sidi Trad	El Taref	63	452	1,8	Chloruré-sodique
Hm. Sidi Slimane	Tissemsilt	42	2374	5	Chloruré-sodique
Hm. Elssalhine	Khenchla	70	2082	60	Chloruré-sodique
Hm. Serghine	Tiaret	40	4400	12	Chloruré-sodique
Hm. Righa	Ain Defla	68	2466	2,5	Chloruré-calcique
Hm. ksenia	Bouira	60	3520	50	Chloruré-sodique

**Tableau I.1:** caractéristiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie [6]

Bien que le potentiel géothermique soit très important dans notre pays, le domaine de l'exploitation reste limité et se restreint principalement à la balnéothérapie et aux utilisations domestiques.

En plus des nombreuses sources thermales dans le Nord du pays, il existe dans le Sud algérien et plus exactement dans le Sahara septentrional une importante réserve en eau thermale qui est la nappe du continental intercalaire. Dans la figure I.3 sont illustrées les caractéristiques de quelques forages Albien du Sud de l'Algérie.

Forage	Région	Débit (l/s)	Rédus secs (mg/l)	Temp. (°C)	Faciés chimique
H011-516	El Oued	197	1970	65	Sulfaté-sodique
H011-516	El Oued	197	1970	65	Sulfaté-sodique
J0010-94	Ouargla	120	1620	51	Sulfaté-calciq
L011-11	Ouargla	22	3333	48	Sulfaté-sodique
H006-64	Laghouat	10	435	-	Sulfaté-sodique
H008-59	Laghouat	12	2300	34	Sulfaté-calciq
I009-55	Ghardaia	160	1569	40,75	Chloruré-sodique
J008-78	Ghardaia	22	1750	-	Chloruré-sodique
G010-84	Biskra	4	909	-	Sulfaté-sodique
G009-109	Biskra	100	2822	53	Chloruré-sodique
J0011-11	Ouargla	150	1760	60	Sulfaté-calciq

**Tableau I.2:** Données physico-chimiques de quelques forages albiens du sud de l'Algérie[6]

L'exploitation de l'énergie géothermique dans le Sud de l'Algérie peut être facilitée considérablement grâce aux nombreux forages pétroliers qui traversent le territoire saharien.

## I.7 Conclusion

La géothermie est la troisième énergie renouvelable effectivement exploitée dans le monde après la biomasse et l'hydraulique. L'utilisation de l'énergie géothermique est en plein développement, il est possible d'exploiter dans différentes applications, telles que le chauffage d'habitation, le chauffage de serres, la production d'électricité, le séchage, etc.

**Chapitre II**

II.1 Introduction

Les ressources géothermiques à basse température (température inférieure à 150 °C) sont valorisées à travers le monde pour des usages directs de chaleur grâce au doublet géothermique, ou pour la fabrication d'électricité par le biais du Cycle Organique de Rankine.

II.2 Le Cycle de Rankine

Ce cycle tire son nom du physicien écossais William Rankine. Il s'agit d'un cycle thermodynamique permettant de récupérer une énergie thermique et de la convertir en électricité par un intermédiaire mécanique. Dans un cycle de Rankine, l'eau est utilisée comme fluide de travail. Elle va alors suivre une succession d'étapes au cours desquelles son état, sa température et sa pression seront modifiés.

Ainsi, l'évaporation de l'eau sous haute pression permet de récupérer la chaleur disponible de la source. En sortie d'évaporateur, la vapeur d'eau atteint sa température la plus haute dans le cycle. Cette vapeur est ensuite détendue dans une turbine jusqu'à la pression basse. La détente permet de générer l'énergie mécanique qui sera convertie en énergie électrique. La vapeur restante dans le système est ensuite condensée, généralement en utilisant une source froide ayant l'avantage d'être peu onéreuse, l'eau de rivière par exemple. Pour finir, l'eau liquide est compressée par l'intermédiaire d'une pompe qui permet la circulation du fluide dans le cycle.

La Figure II.1 représente les diverses étapes du cycle de Rankine.

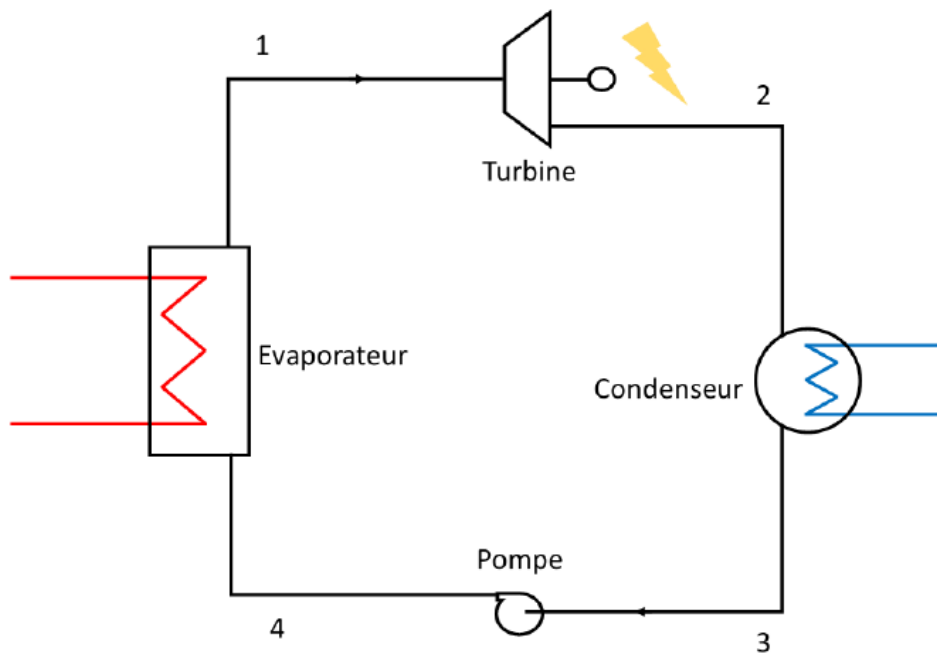


Figure II 1: Représentation schématique d'un cycle de Rankine

Les transformations subies par l'eau sont donc les suivantes :

- 1→2 détente de la vapeur d'eau à haute pression vers la pression basse dans la turbine, cette étape permet de générer l'électricité ;
- 2→3 condensation du mélange liquide – vapeur ;
- 3→4 compressions de l'eau liquide vers la pression haute ;
- 4→1 évaporations de l'eau liquide à haute pression, cette étape permet de récupérer la chaleur de la source chaude.

### II.3 Le cycle organique de Rankine

Le cycle de Rankine organique, « Organic Rankine cycle » (ORC) en anglais, se distingue du cycle Rankine traditionnel par la nature de son fluide moteur, qui est dit « organique ». L'ORC est une technologie permettant la conversion de chaleur basse température en électricité. D'une part, elle permet la production d'énergie électrique propre à partir de sources renouvelables comme l'énergie solaire, géothermique ou provenant de la biomasse. D'une autres part, elle participe à améliorer l'efficacité énergétique des procédés au travers de la récupération et de la valorisation de la chaleur fatale, en électricité.

Les systèmes ORC sont utilisés pour la production d'électricité dans plusieurs cas de figure:

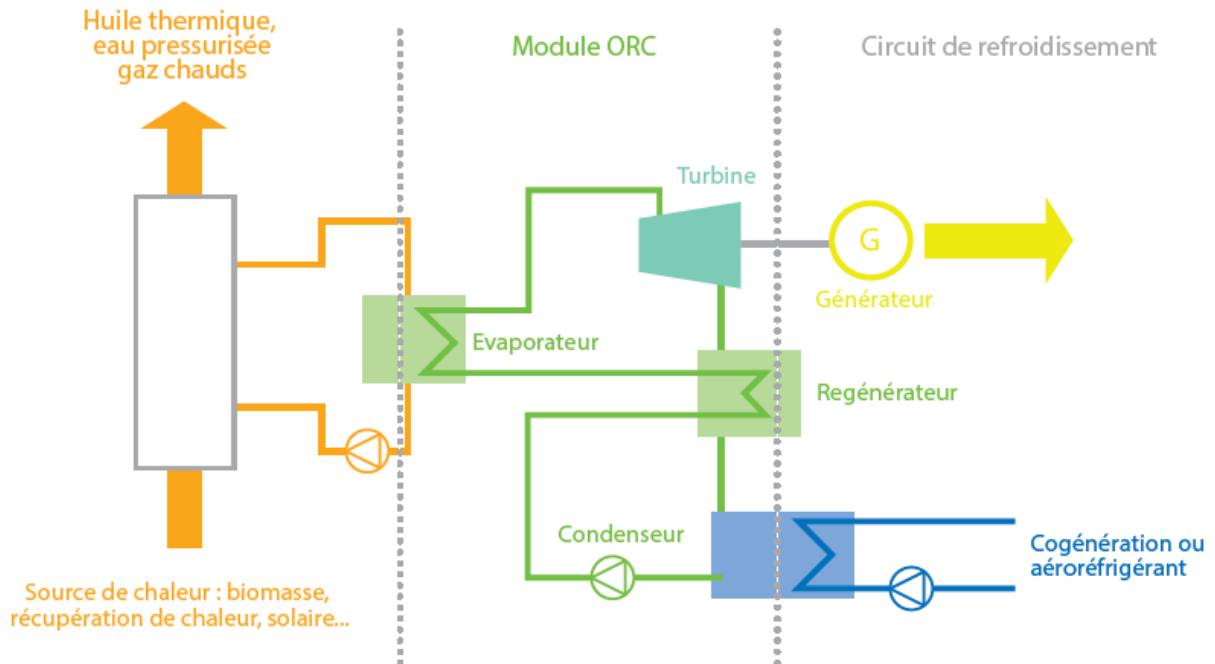
- Température géothermique entre 90 et 200°C
- Améliorer les performances d'un système standard.
- Refroidir l'eau géothermique avant d'alimenter le chauffage à distance
- En cas de faible demande de chauffage en été
- Zones où le réseau électrique n'est pas disponible
- Rejets thermiques sont disponibles

### II.4 Principe de fonctionnement des ORC

Le principe est le même que la machine à vapeur de Rankine. La vapeur d'eau traditionnellement utilisée dans les centrales thermiques à vapeur est remplacée dans l'ORC par un fluide organique. Ce fluide circule en circuit fermé et est préchauffé en plusieurs étapes. Il est dans un premier temps pompé, puis vaporisé par une source de chaleur. La vapeur est ensuite détendue dans une turbine pour produire de l'énergie mécanique qui sera transformée en électricité par un alternateur. Après la turbine, une partie de l'énergie est

recupérée pour préchauffer le fluide avant vaporisation. Le fluide est enfin condensé pour retrouver son état liquide initial puis pompé à nouveau pour recommencer le cycle. On peut augmenter la température de condensation pour faire de la cogénération.

L'intérêt de l'utilisation d'un tel cycle vient du fait que le cycle classique ne permet pas de récupérer de la chaleur basse température (inférieure à 300°C) de façon performante [10].



**Figure II 2:** schéma de principe du fonctionnement d'un cycle organique de Rankine

### II.5 Fluides organiques

La génération d'électricité à partir de source thermique basse température est possible grâce à l'utilisation de fluide organique dont la propriété principale est de se vaporiser à basse température permettant ainsi une exploitation de la chaleur. Les fluides organiques sont issus de la chimie du carbone. De nombreux fluides sont potentiellement utilisables dans un ORC, pour s'adapter au mieux à la température de la source chaude. On retrouve entre autre :

- ❖ Les réfrigérants : ils sont utilisés généralement pour des sources à basse température (<150 °C).
- ❖ Les hydrocarbures : ils sont utilisés pour la valorisation des sources à moyenne température (150 °C-250°C).
- ❖ Les siloxanes : Ce sont des fluides carbonés possédant un ou plusieurs atomes de silicium. Leur utilisation est préconisée pour des sources chaudes avec des températures supérieures à 250°C.

Ainsi, Wang et al. [11] proposent quelques fluides utilisables sur des plages de température de source chaude (Figure II.3).

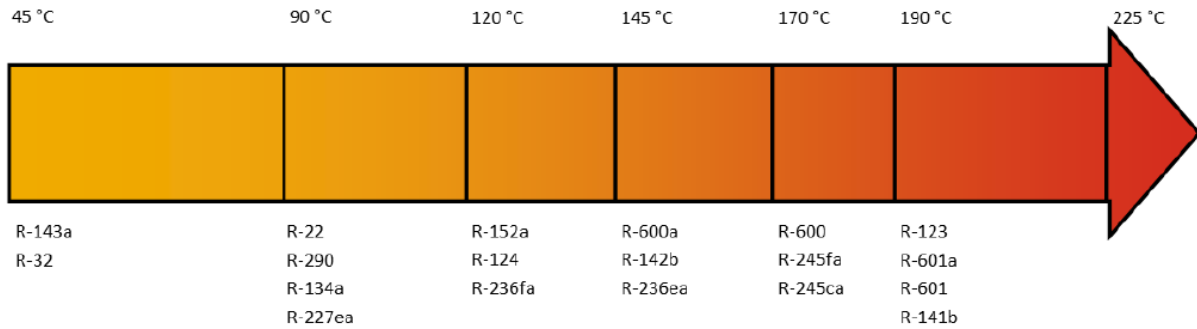


Figure II 3 : liste de travail utilisable selon la température de la source chaude

Un point qui mérite d’être souligné est la forme de la courbe de saturation sur un diagramme T-S. Il existe trois catégories de fluides: les fluides secs, humides et isentropiques. Ces définitions font référence à la pente de la courbe de saturation de vapeur qui est respectivement : positive, négative et infinie. La Figure II.4 représente le diagramme T-S d’un fluide sec à gauche et d’un fluide humide à droite. On peut aussi y voir, sur chaque diagramme, deux isobares suivies d’une détente isentropique. Ces dernières montrent le fait que, pour un fluide humide, il est préférable d’effectuer une surchauffe afin d’éviter au maximum la formation de gouttelettes dans l’organe de détente. Pour un fluide sec, la surchauffe n’est pas nécessaire et l’utilisation d’un récupérateur est possible en sortie d’expandeur. En conclusion, un fluide sec ou isentropique est préférable.

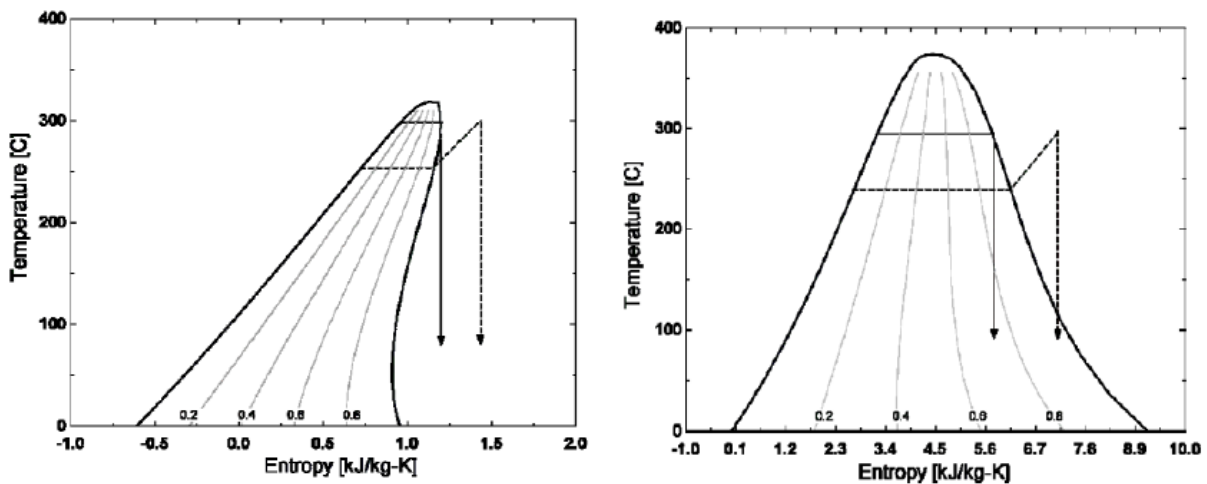


Figure II 4: Diagramme T-S d'un fluide sec et d'un fluide humide

À noter que le choix du fluide organique ne se fait pas uniquement en fonction de la température mais également en fonction d’un grand nombre de critères tant

thermodynamiques que de sécurité, de coût, de toxicité, d'environnement et etc. A prendre en compte.

### II.6 Les différents systèmes ORC

Dans la littérature, il existe plusieurs configurations du cycle ORC pour la génération d'électricité, parmi les plus utilisées sont les deux configurations sous-critique : ORC simple(ou standard) et avec un échangeur de chaleur interne (récupération). [12]

#### II.6.1 Cycles ORC standards

Dans un cycle ORC standard (Figure II. 5), dans un premier temps, le fluide de travail qui se trouve à l'état du liquide saturé (ou légèrement sous-refroidi) à la pression de condensation est porté à la haute pression grâce à la pompe, cette pression est inférieure (ORC sous-critique) ou supérieure (ORC supercritique) à sa pression critique. Ensuite, le fluide de travail est chauffé, puis vaporisé (cycle sous-critique) dans l'évaporateur à haute pression grâce à la chaleur du fluide qui constitue la source de chaleur du cycle. La chaleur qu'il transporte peut être par exemple une chaleur fatale correspondant aux rejets thermiques d'un processus industriel ou à des gaz d'échappement d'un moteur à combustion interne.

Dans le cas du cycle ORC supercritique, l'étape d'évaporation avec le changement de phase présente dans le cas sous-critique disparaît.

A la sortie de l'échangeur de chaleur à haute pression, le fluide de travail libère son énergie dans les aubages de la turbine pendant l'étape de détente. Finalement, le fluide cyclé à la pression basse est refroidi et condensé voire légèrement sous-refroidi en rejetant son énergie à un puits froid avant d'être renvoyé vers l'échangeur de chaleur à haute pression pour compléter la boucle.

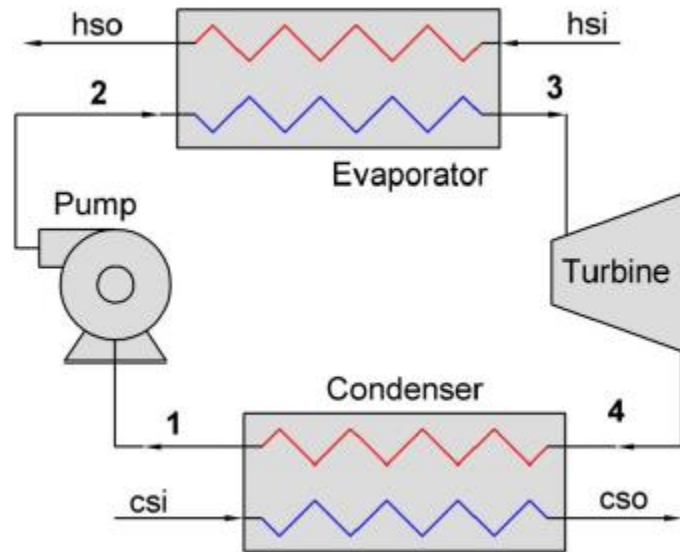


Figure II 5: Schéma du cycle ORC simple

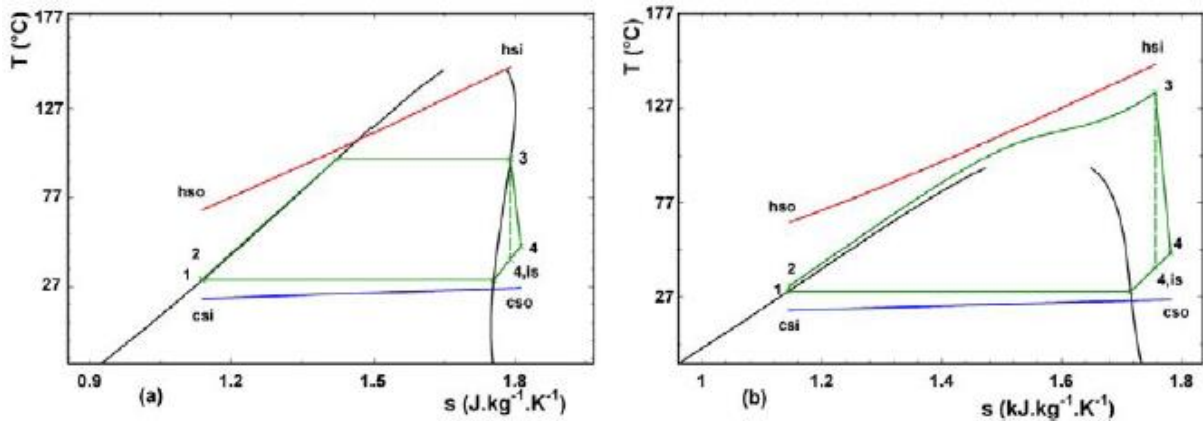


Figure II 6: Diagramme T-S pour un cycle ORC simple sous-critique (a) et supercritique (b)

### II.6.2 Cycles ORC avec un échangeur de chaleur interne

Dans les cas où la vapeur du fluide de travail à la sortie de la turbine est suffisamment chaude, on ajoute au cycle de bas un échangeur de chaleur interne, en anglais 'InternalHeatExchanger' (IHE). Avant refroidissement et condensation de cette vapeur, une partie de son énergie est transférée au liquide provenant de la pompe au niveau de cet échangeur interne de récupération.

Cette récupération d'énergie diminue donc la quantité de chaleur demandée pour le préchauffage du fluide avant son entrée dans l'évaporateur et la quantité de chaleur du fluide de travail déchargée au puits froid et donc la taille du condenseur. Avec le récupérateur, la performance du cycle ORC est améliorée mais le système est plus complexe amenant à un coût d'investissement plus élevé. En plus, le récupérateur augmente également la perte de charge totale du système.

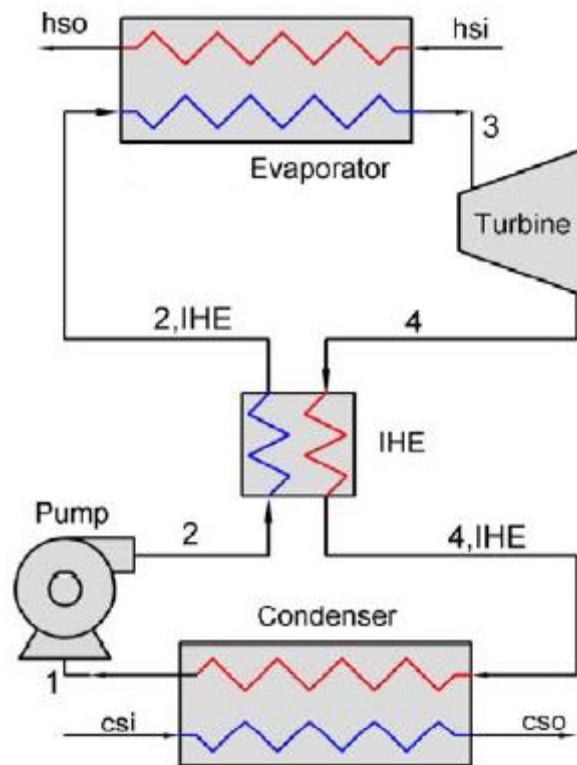


Figure II 7: Schéma du cycle ORC avec un échangeur interne (IHE) comme récupérateur

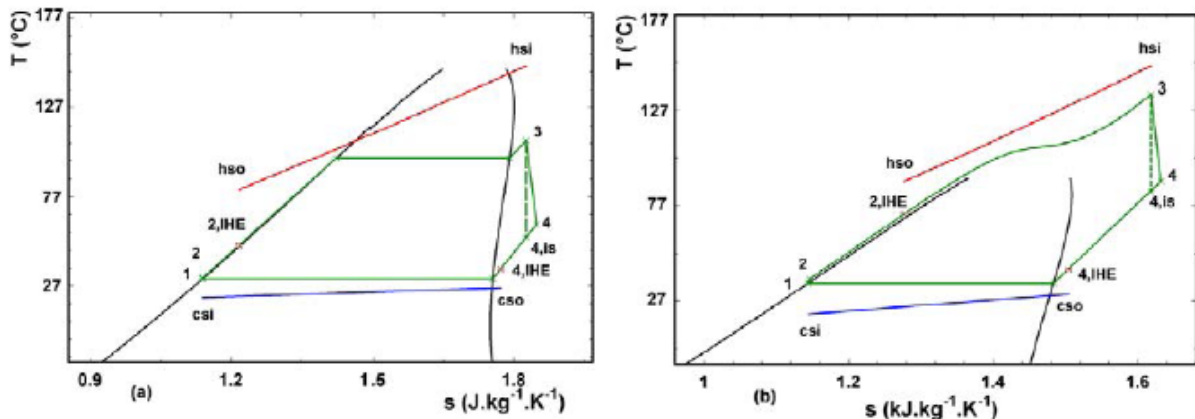


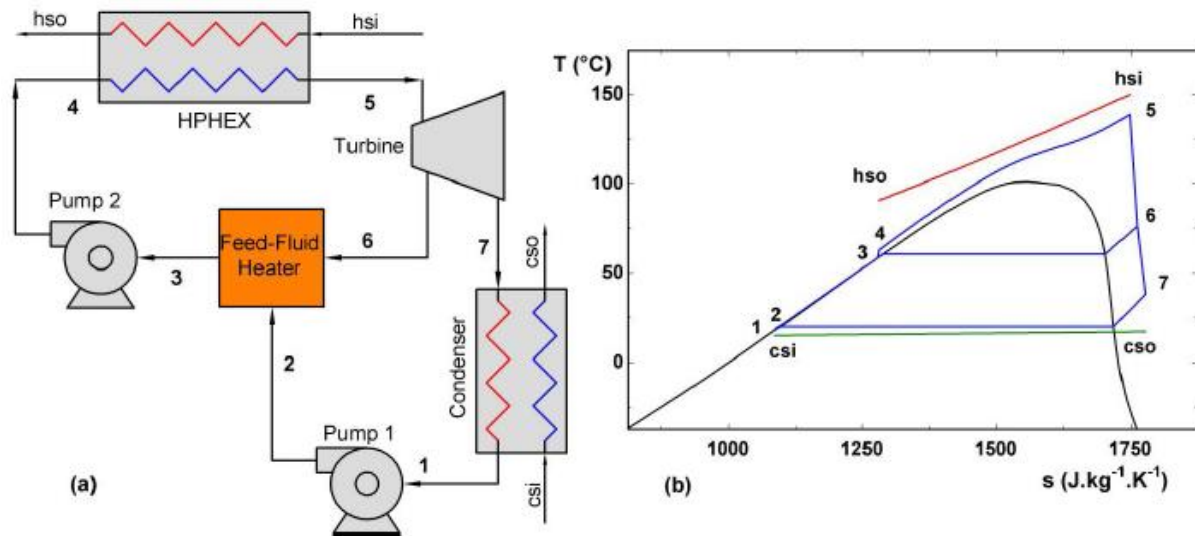
Figure II 8: Diagramme T-S avec un récupérateur sous-critique(a) et supercritique(b)

### II.6.3 Cycle ORC « régénératif » (ou avec sous-tirage)

Une autre solution pour améliorer la performance du cycle ORC est le cycle à sous tirage que l'on appelle aussi cycle régénératif (Figure II.9). Dans cette configuration, nous considérons qu'un échangeur de type de contact direct (Feed-Fluidheater – FFH) est inclus dans le circuit du cycle ORC standard, cet échangeur de chaleur est appelé « régénérateur ». Une partie du débit vapeur est soutirée de la turbine pour aller réchauffer le liquide avant son entrée dans l'échangeur de chauffage. L'intérêt de cette façon de procéder est le fait que le liquide à la sortie de la pompe est d'abord chauffé avec source (la vapeur soutirée de la

turbine) qui se trouve à une température qui n'est pas excessivement différente de la température du fluide à chauffer. Il en résulte à priori globalement une moindre création d'entropie, soit une moindre destruction d'exergie, et donc un meilleur rendement exergetique de l'installation.

Sur la Figure II.9 qui présente le schéma de cette configuration, nous mettons aussi le diagramme T-s supercritique du fluide de travail qui décrit ce cycle.



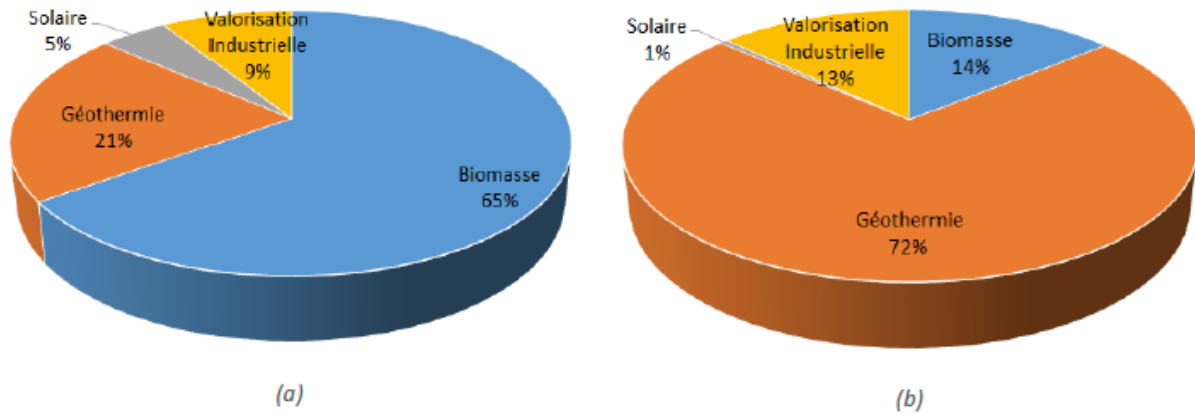
**Figure II 9:** Schéma d'un cycle ORC avec soutirage (a) et le diagramme T-S supercritique (b) du fluide de travail

### II.7 Application des ORC

La technologie ORC permet de récupérer l'énergie de diverses sources. Ces sources de chaleur sont principalement

- ❖ la biomasse,
- ❖ la géothermie,
- ❖ le solaire,
- ❖ ET la chaleur libérée dans les industries.

La Figure II.10 montre la répartition des ORC par secteur d'activité [13]



**Figure II 10:** Répartition des sites ORC par secteur d'activité (a) en nombre (b) en puissance installée

### II.7.1 La biomasse

La biomasse est la source de chaleur alimentant les ORC la plus répandue, en nombre d'installations. En brûlant, la biomasse chauffe une huile thermique initialement à 150°C jusqu'à 320°C. La chaleur de l'huile est ensuite utilisée dans la boucle ORC pour évaporer le fluide organique de l'ORC à une température proche de 300°C. Après plusieurs étapes, dont la détente et la condensation, le fluide organique atteint 90°C environ. Pour utiliser au maximum l'énergie disponible, les centrales biomasses combinent généralement génération d'électricité et de chaleur. Ainsi l'eau servant à la condensation du fluide peut-être, par exemple, valorisée dans un réseau de chauffage urbain. La plupart du temps, la récupération d'énergie pour ce type de centrale est limitée à 6 – 10 MWth, soit une production électrique de 1 à 2 MWe.

### II.7.2 Énergie solaire

L'énergie solaire concentrée est une technologie par laquelle le rayonnement du soleil est concentré par un collecteur solaire et transféré à un fluide à haute température. L'énergie thermique est convertie en électricité dans un cycle thermodynamique. Deux possibilités pour la conception des centrales solaires ORC en termes de température maximale du fluide de travail peuvent être distinguées. Les centrales de température moyenne (> 250 °C) imposent un rendement élevé de conversion mais un moteur cher et des collecteurs coûteux. Les centrales solaires de basse température (< 150 °C) amènent au contraire à faible rendement avec des composants moins cher comparativement.

### II.7.3 Energie géothermique

L'énergie géothermique est définie comme la chaleur qui vient de la Terre. C'est une ressource propre et renouvelable qui fournit l'énergie pour une variété d'applications et de ressources. Cette ressource d'énergie est considérée comme une ressource renouvelable parce que la chaleur émanant de l'intérieur de la planète est essentiellement illimitée à notre échelle.

Un système géothermique est basé sur la chaleur, la perméabilité et l'eau. La chaleur du centre de la Terre, atteint parfois la surface comme la lave volcanique, mais reste souvent au-dessous de la croûte de la planète, chauffant la roche et l'eau à proximité. L'eau chaude ou la vapeur d'eau peut être piégée dans des roches perméables ou poreuses sous une couche de roche imperméable. Un réservoir géothermique peut donc se former.

L'énergie géothermique peut être utilisée pour la production d'électricité, des objectifs de chauffage commercial, industriel et résidentiel direct. Actuellement, il existe plusieurs configurations de centrale géothermique.

Centrale à vapeur d'eau à mono-condensation (single-flash steam power plants)

- ❖ Centrale à vapeur d'eau à double-condensation (double-flash steam power plants)
- ❖ Centrale à vapeur d'eau sèche
- ❖ Central à cycle binaire

Les systèmes de conversion d'énergie géothermique avancés: systèmes hybrides de mono- et double-condensation, systèmes hybrides des centrales à condensation et des centrales à cycle binaire.

### II.7.4 Récupération et valorisation des rejets thermiques industriels

Dans plusieurs procédés industriels, une quantité significative de l'énergie thermique de température moyenne et élevée (150 – 350 °C) est toujours rejetée dans l'atmosphère.

En plus d'être perdue, cela a un impact néfaste sur l'environnement. La valorisation de cette chaleur a donc un double enjeu, un enjeu économique et un enjeu environnemental. Les sources de chaleur perdue potentielles pour la récupération par des centrales ORC sont trouvées dans des industries les plus grosses consommatrices d'énergie tels que: l'industrie du ciment, du verre, de la sidérurgie, et du pétrole et gaz (raffineries) ainsi que dans des usines d'incinération.

### II.8 Description du système thermodynamique étudié

Dans cette étude, le cycle organique de Rankine qui est modélisé, correspond au cycle présenté par Liu et al. [14]. Il est choisi dans sa configuration simple (sans récupération

interne de chaleur), comme montré dans la figure II.11 avec son diagramme T-s illustré dans la figure II.12.

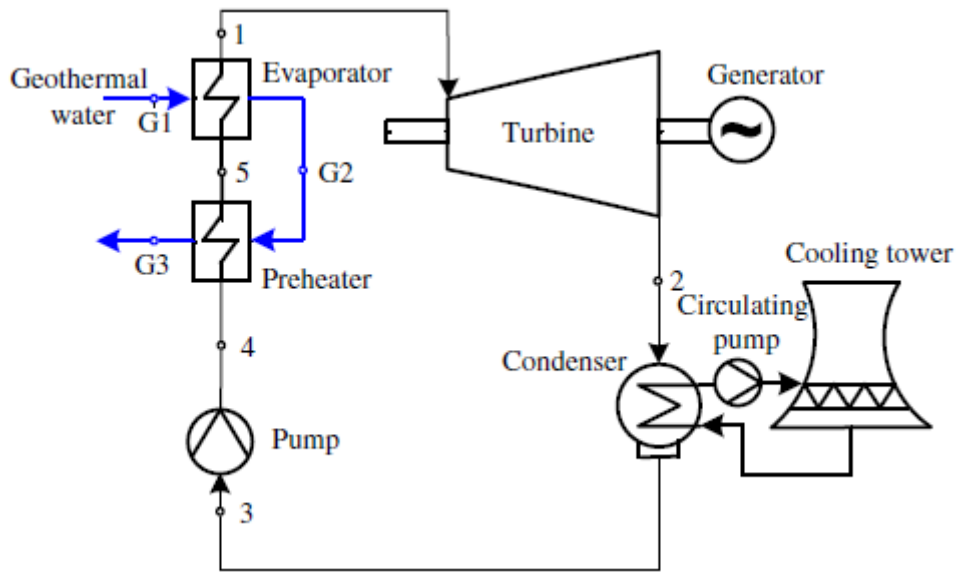


Figure II.11: Schéma d'un ORC simple géothermique avec une tour de refroidissement

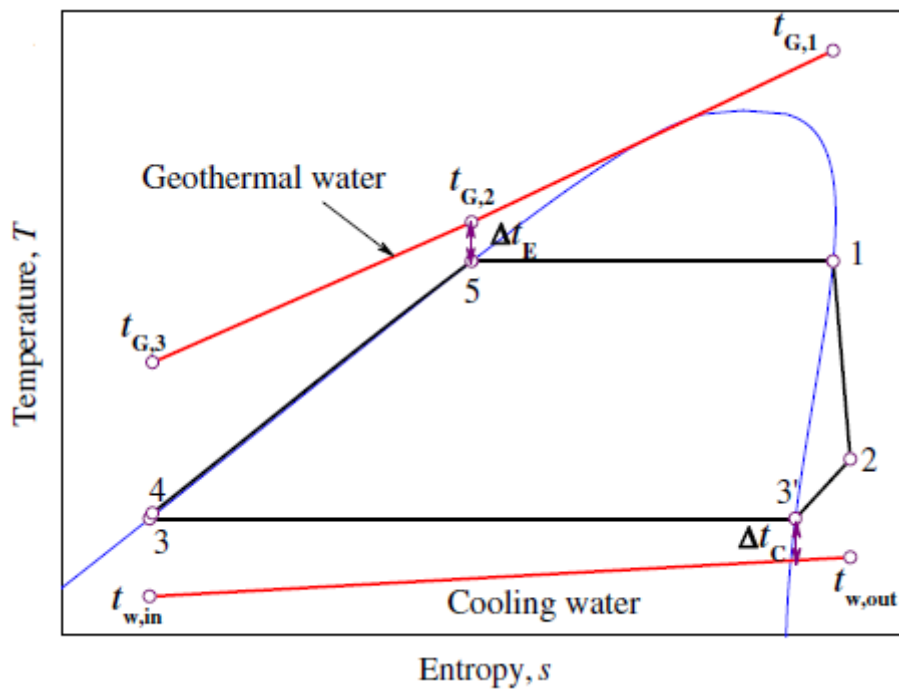


Figure II.11: Cycle thermodynamique pour le système ORC standard

Ledit cycle est alimenté par la source géothermal à une température fixée à 130°C et 150°C alors que le rejet de chaleur est assuré par des condenseurs conduisant à une condensation du fluide de travail à 30°C. Pour l'évaporateur et le condenseur, une valeur minimale du pincement est imposée. Un pincement thermique de 10°C est imposé à l'entrée

de l'évaporateur et un pincement thermique de 5°C est au niveau du condenseur. Pour un ORC sous-critique, la surchauffe n'augmente pas la puissance de sortie pour des températures d'évaporation inférieures à 0,9 Tc mais augmente la température de sortie de la turbine et augmente la complexité du système. [14]

La température de réinjection,  $t_{G3}$ , à la sortie du préchauffeur ne doit pas être inférieure à 70 °C pour éviter une sursaturation de la silice, ce qui pourrait entraîner un entartrage de la silice et de problèmes d'encrassement dans les échangeurs de chaleur et un dépôt de minéraux dans les tuyaux et les vannes. [15,16]

L'eau géothermique à l'entrée de l'évaporateur est supposée être un liquide saturé et le processus d'échange thermique est supposé isobare.

Le fluide de travail est chauffé d'un liquide sous-refroidi à un liquide saturé (procédé 4-5) dans le préchauffeur puis à une vapeur saturée (procédé 5-1) dans l'évaporateur.

Pour faciliter l'étude thermodynamique de ce système énergétique, nous avons considérés d'autres hypothèses résumées comme suit :

- Les variations de l'énergie cinétique et potentielle sont négligées,
- Nous considérons un mode de fonctionnement stationnaire,
- Les pertes de charges au niveau de tous les échangeurs de chaleur sont considérées nulles,

Les valeurs des paramètres fixés par Liu et al [14] sont résumées dans le tableau II.1

Paramètres	valeurs		
Débit de la source géothermale	$\dot{m}_{gw}$	1	kg/s
Température de la source géothermale disponible	$T_{gw.1}$	1130 et 150	°C
Température de réinjection minimale dans la source géothermale	$T_{gw.3}$	$\geq 70$	°C
Pincement minimal de température a l'évaporateur	$Pinch_{min.E}$	$\geq 10$	°C
Pincement de température au condenseur	$Pinch_{min.C}$	5	°C
Température d'entrée de l'eau de refroidissement	$T_{cw.1}$	20	°C
Température de sortie de l'eau de refroidissement	$T_{cw.2}$	25	°C
Rendement isentropique de la turbine	$\eta_t^{is}$	85	%
Rendement isentropique de la pompe	$\eta_p^{is}$	65	%
Rendement du générateur électrique	$\eta_g$	95	%
Rendement mécanique	$\eta_m$	98	%

Tableau II.1: valeurs des paramètres fixés par Liu et al.

Ainsi, les équations de bilans énergétiques sont exprimées pour chaque composant du système en fonctions des enthalpies des différents points du cycle thermodynamique.

➤ **Le préchauffeur :** En absorbant la chaleur fournie par la source de chaleur; le préchauffeur permet d'augmenter la température du fluide de travail. Le bilan de conservation de l'énergie peut être exprimé comme :

$$\dot{m}_G(h_{G,2} - h_{G,3}) = \dot{m}_O(h_5 - h_4) \quad (\text{II.1})$$

Où :  $\dot{m}_G$  est le débit d'eau géothermique et  $\dot{m}_O$  est le débit de fluide.

➤ **L'évaporateur :** Comme son nom l'indique, il permet l'évaporation du fluide de travail en le faisant passer d'un fluide à l'état liquide saturé à un fluide à l'état vapeur saturée d'une manière isotherme. Le bilan de conservation de l'énergie peut être exprimé comme

$$\dot{m}_G(h_{G,1} - h_{G,2}) = \dot{m}_O(h_1 - h_5) \quad (\text{II.2})$$

La relation de température au point de pincement dans l'évaporateur est donnée par

$$\Delta t_E = t_{G,2} - t_5 = t_{G,2} - t_1$$

(II.3)

➤ **La turbine:** La détente des vapeurs saturée au niveau de la turbine va permettre de produire un travail (spécifique) mécanique qui va à son tour entrainer un générateur et donc produire de l'électricité désirée. Les fluides secs avec une courbe de saturation en pente positive dans le diagramme T -s ont de meilleures performances thermiques car le fluide ne se condense pas après avoir traversé la turbine, contrairement aux fluides humides qui se condensent après la détente [17]. La puissance produite par la turbine est donc calculée comme

$$W_T = \dot{m}_O(h_1 - h_{2s})\eta_T = \dot{m}_O(h_1 - h_2) \quad (\text{II.4})$$

Où  $\eta_T$  est le rendement isentropique de la turbine.

➤ **Le condenseur:** Le fluide de travail sous forme de vapeur en sortie de la turbine est conduit au niveau des condenseurs. Après une étape de refroidissement des vapeurs surchauffée; la condensation proprement dite du fluide de travail va permettre de le transformer en liquide saturé avant son refoulement vers la pompe de circulation. La chaleur rejetée par le condenseur s'exprime alors

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_o(h_2 - h_3) \quad (\text{II.5})$$

➤ **La pompe de circulation:** Ce composant permet la pressurisation du fluide de travail jusqu'à la haute pression caractérisant le cycle. Cela nécessite la consommation de puissance suivante

$$W_p = \frac{\dot{m}_o(h_{4s} - h_3)}{\eta_p} = \dot{m}_o(h_4 - h_3) \quad (\text{II.6})$$

Où  $\eta_{ps}$  est le rendement isentropique de la pompe.

La puissance nette générée par le cycle ORC est calculée comme

$$W_{net} = W_T \eta_m \eta_g - W_p = \dot{m}_o w_{net} \quad (\text{II.7})$$

Où  $\eta_m$  est le rendement mécanique de la turbine,  $\eta_g$  est le rendement du générateur et  $w_{net}$  est la puissance nette spécifique.

La puissance nette spécifique est calculée par la relation suivante

$$w_{net} = (h_1 - h_2)\eta_m\eta_g - (h_4 - h_3) \quad (\text{II.8})$$

Après avoir établies le bilan énergétique pour les différents composants ainsi que les enthalpies de tous les points du cycle; le rendement thermique du cycle thermodynamique se déduit directement :

- Sans récupérateur :

$$\eta_{ORC} = \frac{W_{net}}{\dot{m}_o(h_1 - h_4)} \quad (\text{II.9})$$

- Avec un récupérateur:

$$\eta_{ORC} = \frac{W_{net}}{\dot{m}_o(h_1 - h_{4a})} \quad (\text{II.10})$$

## II.9 Conclusion

Ce second chapitre a pour but de faire comprendre le principe du fonctionnement d'un cycle organique de Rankine basé sur le cycle de Rankine mais utilisant un composé organique de basse température d'ébullition à la pression atmosphérique, en remplacement de l'eau comme fluide de travail. La technologie ORC mentionné dans le chapitre se focalise sur quatre applications principales ;la géothermie, la biomasse, la récupération de la chaleur et l'énergie solaire thermodynamique. Les configurations des systèmes ORC ont été présentées avec une comparaison technique entre les différentes configurations.

La configuration du système ORC retenu correspond au cycle présenté par Liu et al, le cycle ORC sous-critique est la configuration la plus utilisée pour sa simplicité, sa sécurité et sa stabilité de fonctionnement.

## Chapitre III

### III.1 Introduction

Le développement de l'informatique dans le domaine de la simulation, nous permet de se passer du calcul manuel long, par l'utilisation des logiciels de simulation.

Les simulateurs existants tels que Aspen Plus, ChemCAD, HYSYS, Pro-II sont les plus vendus et deviennent de plus en plus indispensables pour concevoir de nouvelles unités et pour optimiser les précédentes qui fonctionnent parfois loin de leur optimum. Cela dit, le simulateur Aspen est l'un des plus performants logiciels de simulation.

### III.2 Définition de la simulation

La simulation est définie comme étant la représentation d'un phénomène physique à l'aide de modèles mathématiques simples permettant de décrire son comportement.

#### Autrement dit

La simulation permet de représenter par des modèles mathématiques les différents phénomènes de transfert de masse, d'énergie et de quantité de mouvement qui se produisent dans les différentes opérations unitaires. [18]

### III.3 Modes de fonctionnements des simulateurs

Il ya deux modes de fonctionnement dans un simulateur : statique (stationnaire) et dynamique.

Les simulateurs statiques résolvent des équations statiques qui traduisent les fonctionnement en régime permanent (a équilibre), tandis que les simulateurs dynamique vise à définir les propriété des variables en fonction du temps, pendant des situations transitoires ou le régime n'est pas stable[19]. Les simulateurs industriels sur la thermodynamique les plus connus mondialement sont [18]:

- Statique : Aspen Plus (Aspen Technologies), Design II de (WinSim), HYSYS (Hyprotch), PRO II (Simulation Sciences), PROSIM.
- Dynamique : HYSYS(Hyprotch), ASPEN DYNAMICS (Aspen Technologies), Design II de (WinSim), DYMSYM (Simulation Sciences Inc).

### III.4 Utilisation de la simulation

-Les différentes tâches qu'un simulateur de procédé devrait effectuer sont: [18]

#### a) Dans la conception d'un procédé

- Etablir des bilans de matière et d'énergie d'un procédé industriel.
- Dimensionner les équipements de ce procédé.
- L'évaluation économique du procédé
- L'optimisation du procédé

### b) Dans le suivi des procédés qui sont déjà installés

- Réajustement des paramètres de fonctionnement dans le cas des changements de composition de l'alimentation.
- Détermination de la performance des équipements

## III.5 Présentation du logiciel Aspen HYSYS

### III.5.1 Définition du logiciel Aspen HYSYS

Aspen HYSYS est un outil de modélisation de processus de simulation en régime permanent, la conception performance, le suivi, l'optimisation et la planification des activités pour les produits chimiques, les produits chimiques de spécialité, la pétrochimie et les industries et la métallurgie.

HYSYS n'est pas le logiciel de simulation le plus flexible, ni le plus utilisé dans l'industrie, mais il a l'avantage d'être convivial et facile à utiliser une fois que les éléments de base sont compris. HYSYS a été développé pour l'industrie du pétrole, bien qu'il soit utilisé pour d'autres types de procédés chimiques. Les simulations sont accomplies en utilisant les outils des menus. En plus, il dispose d'une interface graphique pour la construction des diagrammes du procédé (PDF – Process Flow Diagrams). [20]

### III.5.2 Les concepts de la base du simulateur HYSYS

Dans ce qui suit, on définit les principaux concepts de base et vocabulaires associés, qui sont utilisés pendant les étapes de construction d'un modèle dans le simulateur HYSYS.

- « Flowsheet » : c'est un ensemble d'objets « FlowsheetElements » (courants de matière, d'énergie, d'opérations unitaires, de variables opératoires) qui constituent tout ou une partie du procédé simulé et qui utilisent la même base de données thermodynamique « Fluid Package ». Ce simulateur possède une Architecture Multi-Flowsheet : il n'y a pas de limite par rapport au nombre de Flowsheets. On peut préalablement construire des Flowsheets pour les utiliser dans une autre simulation, ou organiser la description de procédés complexes en le scindant en sous-Flowsheets qui sont des modèles plus concis (ceci permet de hiérarchiser un processus très complexe).

Il possède un certain nombre d'entités particulières : un « Process Flow Diagram » (PFD), un « Workbook ».

- « Fluid Package » : il permet de définir les composants chimiques présents dans le procédé simulé et leurs affecte les propriétés chimiques et physiques contenues dans la base de données des corps purs. Il permet aussi de définir les modèles thermodynamiques qui seront utilisés pour le calcul des propriétés des mélanges et de définir les cinétiques des réactions chimiques mises en jeu dans le procédé.
- « Process Flow Diagram » : ce diagramme permet de visualiser les courants et les opérations unitaires, représentées par des symboles dans le « Flowsheet », ainsi que la connectivité entre les courants, les opérations unitaires et les tableaux des propriétés des courants.
- « Workbook » : il permet d'avoir accès à l'information sur les courants et les opérations unitaires sous forme de tableau de données.
- « Desktop » : c'est l'espace principal de HYSYS pour visualiser les fenêtres lors de la conception.
- « Propertyview » : il contient l'information décrivant un objet (opération ou courant).
- « Simulation Case » (fichier de simulation) : c'est l'ensemble des « Fluid Packages » « Flowsheets » et « FlowsheetElements » qui constituent le modèle. [18]

### III.5.3 Environnement de simulation

Il existe 5 environnements de développement pour manipuler et mettre en forme l'information dans le simulateur [18]

- **Environnement « Basis Manager »** : cet environnement permet de créer et modifier le « Fluid Package ».
- **Environnement « OilCharacterization »** : il est utilisé pour caractériser les fluides de type pétrolier.
- **Environnement « Main Flowsheet »** : il permet de définir la topologie du Flowsheet principal de la simulation. Il est utilisé pour placer et définir les différents courants, opérations unitaires et « Sub-Flowsheets » qui constituent le procédé simulé.
- **Environnement « Sub-Flowsheet »** : il permet de définir la topologie d'un sous ensemble particulier du schéma principal (un courant ou une opération particulière et des autres Sub-Flowsheets).

- **Environnement « Column »** : c'est un objet particulier permettant de définir la topologie de l'opération unitaire colonne à distiller. Il possède ses propres « Flowsheet », « Fluid Package », « PFD » et « Workbook ».

### III.5.4 Les caractéristiques principales de HYSYS

Cette partie décrit brièvement les caractéristiques importantes qui font de HYSYS une plate-forme de simulation et de développement très puissante. [20]

- **Environnement d'ingénierie intégré** (The Integrated Engineering Environment) : Toutes les applications nécessaires sont utilisées dans un environnement de simulation commun.
- **Intégration de possibilité d'une modélisation** : dans un état stable ou stationnaire et en régime dynamique. la modélisation dans un état stable et l'optimisation étant utilisés lors de conception des procédés. la simulation en régime dynamique étant réservée aux études de contrôlabilité de procédés et au développement de stratégies de contrôle.
- **Programmation de HYSYS** : HYSYS contient un Macro interne qui supporte la même syntaxe que Microsoft Visual Basic. On peut atomiser différentes tâches dans HYSYS sans avoir besoin d'un autre programme.

Voici quelques caractéristiques de HYSYS sur la manière dont sont réalisés les calculs :

- **Gestion des événements (Event Driven)** : HYSYS combine le calcul interactif (les calculs sont exécutés automatiquement chaque fois que l'on fournit une nouvelle information) avec un accès instantané à l'information 'à tout moment on peut avoir accès à l'information depuis n'importe quel environnement de simulation).
- **Gestion intelligente de l'information (Built-in Intelligente)** : les calculs des propriétés thermodynamiques s'effectuent instantanément et automatiquement dès qu'une nouvelle information est disponible.
- **Opération Modulaires** : chaque courant ou unité d'opération peut réaliser tous les calculs nécessaires en utilisant l'information soit indiquée dans l'opération ou communiquée depuis un courant. L'information est transmise dans les deux directions à travers les Flowsheets.
- **Algorithme de résolution non séquentielle** : on peut construire des Flowsheets dans n'importe quel ordre.

### III.5.5 Les modèles thermodynamiques sur HYSYS

Le logiciel offre une panoplie de modèle thermodynamique pour le calcul des propriétés thermodynamiques tels que les constantes d'équilibres liquide vapeur les enthalpies et les entropies... etc et les propriétés physico-chimiques tels que la masse volumiques, la masse moléculaire...

Ces modèles utilisent des outils très divers tels que :

- Les équations d'états de Peng-Robinson(PR). Choe-seader (CS).Soave-RidlichKwong (SRK).
- Les corrélations empiriques et semi empiriques de Choe-Seader (CS) et Bram Grayon(BG).
- Les lois d'états correspondants.

### III.5.6 Les étapes d'utilisation du logiciel HYSYS

Pour réaliser une simulation en HYSYS, les pas suivants sont nécessaires:

- ✓ Démarrage de HYSYS ;
- ✓ Création d'un fichier ;
- ✓ Choix des composés ;
- ✓ Sélection d'un modèlethermodynamique ;
- ✓ Construction du PFD ;
- ✓ Spécification des courants et des unités ;
- ✓ Exécution du programme de simulation ;
- ✓ Interprétation des resultants.

### III.6 Les étapes de simulation du système ORC étudié

Le système étudié décrit précédemment dans le chapitre II est simulé avec le logiciel ASPEN HYSYSv10. Le diagramme du procédé (PDF – Process Flow Diagram) de la configuration considérée dans cette étude est illustré dans la figure III.1.

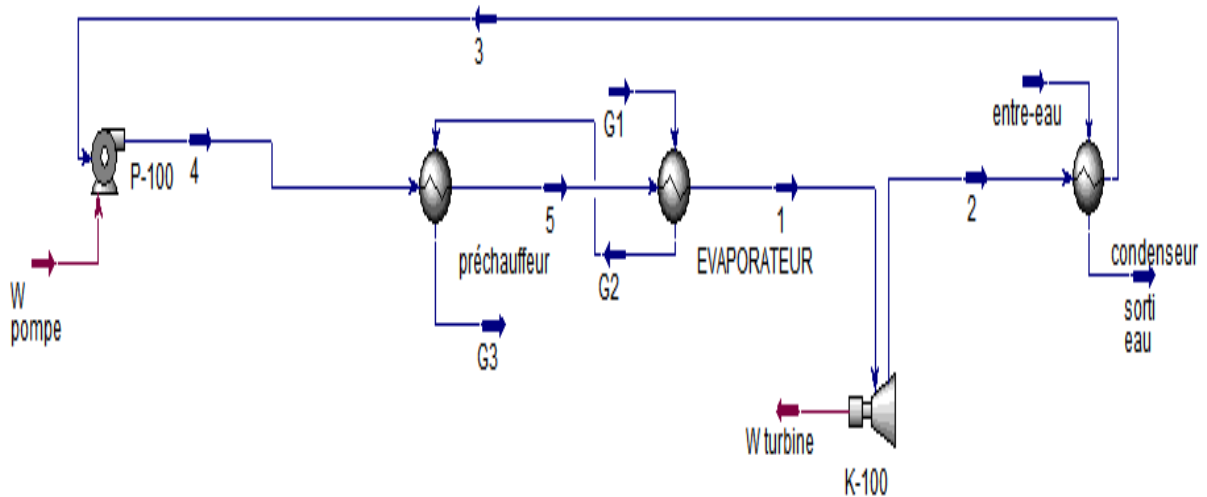
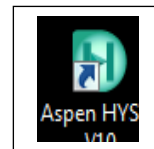
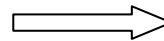


Figure III 1:Schéma d'un système ORC simple étudié

Pour réaliser cette simulation nous avons suivi les étapes suivantes

➤ Démarrage de ASPENHYSYS :

Pour démarrer, appuyer deux fois sur l'icône



Ou bien aller vers démarrer/ Aspen HYSYS on obtient la fenêtre suivante :

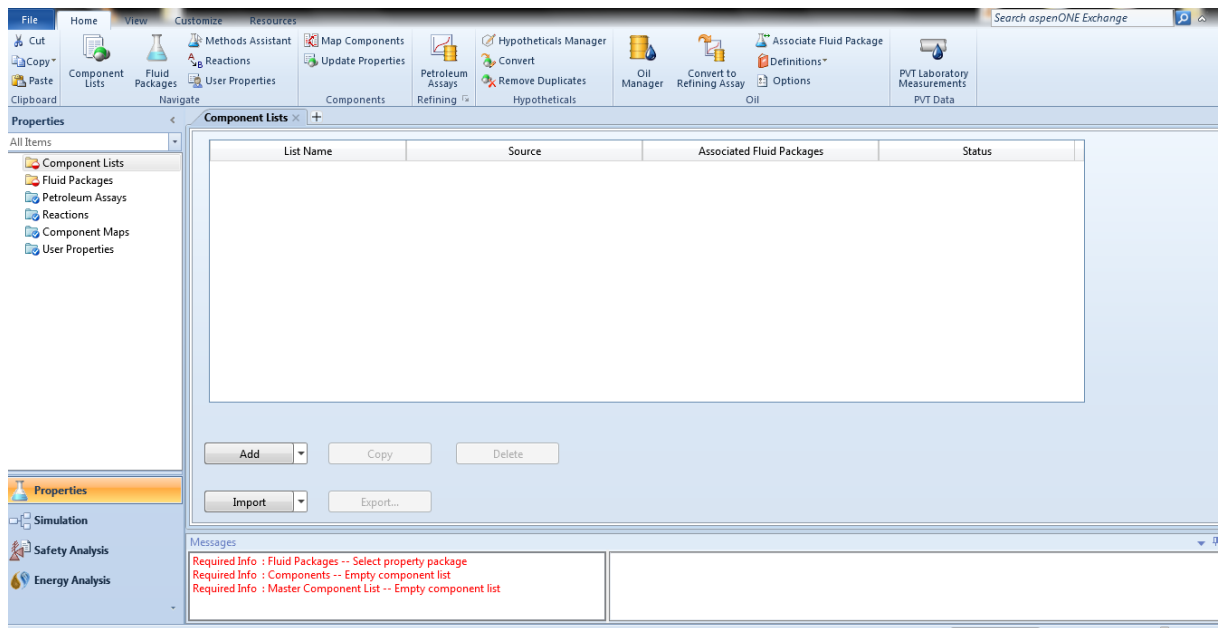


Figure III 2:fenêtre d'ASPEN HYSYS v10

➤ Choix dans la liste des composants

Au début il faut designer à ASPEN HYSYS la composition chimique des fluides qu'on veut utiliser dans le cycle.

Dans notre cas il faut définir les composants chimiques de l'eau et des fluides frigorigènes utilisés tels que : R600a, R600, n-hexane, R601a, R601.

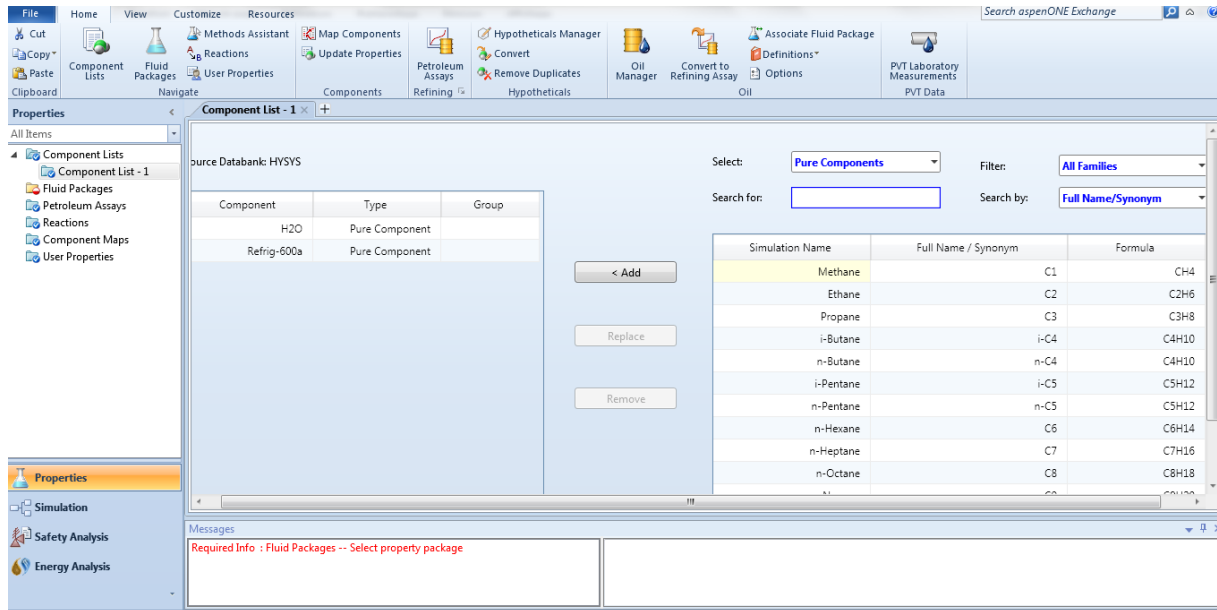


Figure III 3:les différents composants de la simulation

### ➤ Selection d'un modèlethermodynamique

Dans notre étude on a sélectionné le Peng Robinson (PR) comme modèle thermodynamique, qui est recommandé pour un mélange d'hydrocarbures. Cela permet de calculer toutes les propriétés thermos-physiques des fluides de travail.

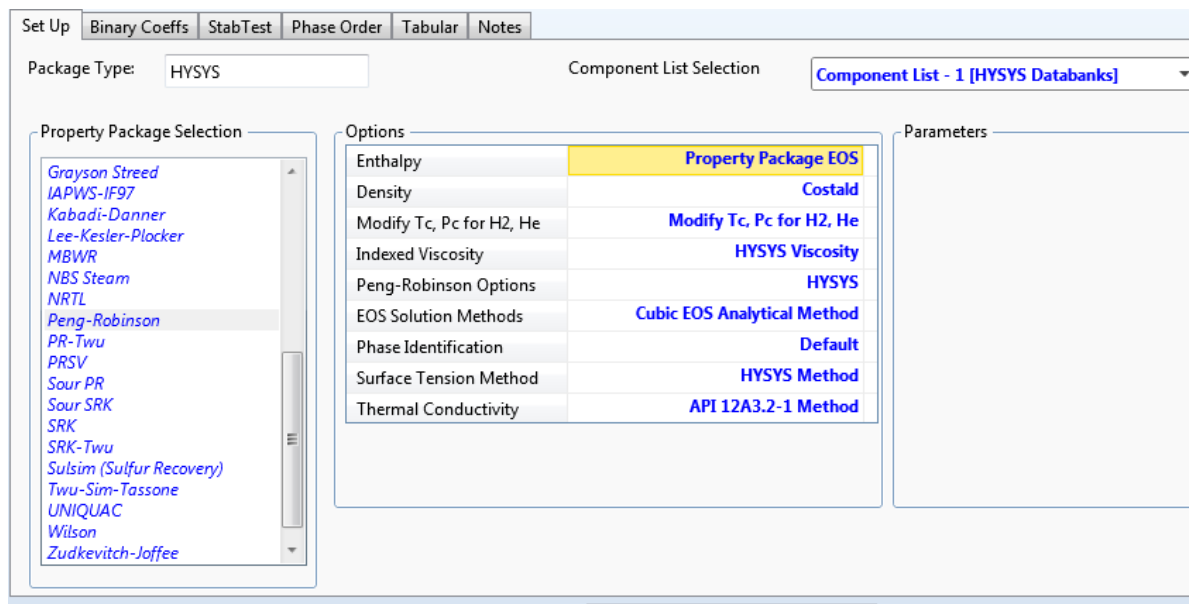


Figure III 4:Liste de fluide package

❖ L'entrée de l'eau géothermale

On définit les caractéristiques de l'eau géothermique qui entré dans l'évaporateur à l'état saturée (la température, et le débit massique) comme illustré dans la figure au-dessous:

Worksheet		Attachments		Dynamics	
Worksheet	Stream Name	G1	Aqueous Phase	Vapour Phase	
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0,0000	1,0000	0,0000	
Properties	Temperature [C]	130,0	130,0	130,0	
Composition	Pressure [bar]	2,705	2,705	2,705	
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	199,8	199,8	0,0000	
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/s]	1,000	1,000	0,0000	
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	3,607	3,607	0,0000	
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2,780e+005	-2,780e+005	-2,384e+005	
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	77,42	77,42	175,5	
Cost Parameters	Heat Flow [kJ/h]	-5,554e+007	-5,554e+007	0,0000	
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	3,547	3,547	0,0000	
	Fluid Package	Basis-1			
	Utility Type				

Figure III 5:Fenêtre des conditions d'entrée d'eau géothermale

➤ Evaporateur

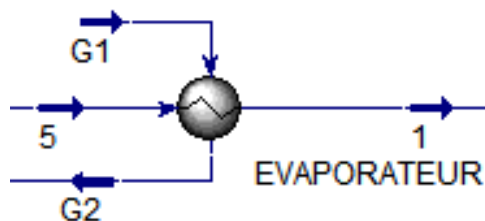


Figure III 6:Présentation de l'évaporateur

On définit les entrées et les sorties dans l'évaporateur, où l'eau géothermale circule dans la calandre et le fluide de travail circule dans les tubes.

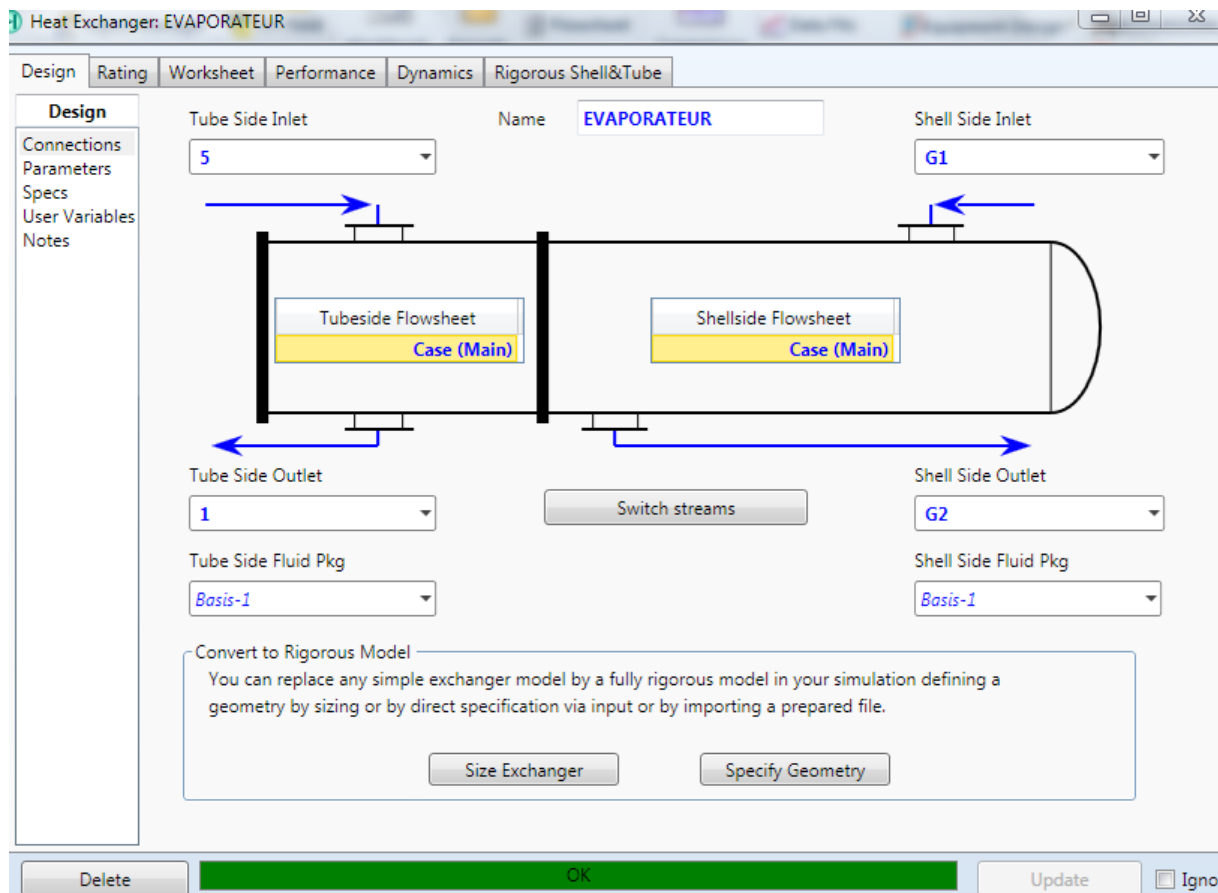


Figure III 7: Installation de l'évaporateur

On définit les conditions et les paramètres de l'évaporateur, qui sont montrés dans les figures suivantes

Heat Exchanger: EVAPORATEUR

Worksheet	Name	5	1	G1	G2
Vapour		0,0000	1,0000	0,0000	0,0000
Temperature [C]		60,00	60,00	130,0	83,00
Pressure [bar]		8,731	8,731	2,705	2,705
Molar Flow [kgmole/h]		44,88	44,88	199,8	199,8
Mass Flow [kg/s]		0,7246	0,7246	1,000	1,000
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]		4,639	4,639	3,607	3,607
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]		-1,457e+005	-1,291e+005	-2,780e+005	-2,817e+005
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]		120,7	170,7	77,42	67,56
Heat Flow [kJ/h]		-6,540e+006	-5,793e+006	-5,554e+007	-5,629e+007

Figure III 8:Fenêtre des conditions de l'évaporateur

Heat Exchanger: evaporator

Design Rating Worksheet Performance Dynamics Rigorous Shell&Tube

**Design**

Heat Exchanger Model: **Simple End Point**

Heat Leak/Loss:  None  Extremes  Proportional

End Point Model

Overall UA [kJ/C-h]: 2,909e+004

Specified Pressure Drop [bar]: SHELL-SIDE 0,0000 TUBE-SIDE 0,0000

Use Ft	Tube Passes	Shell Passes	Shells In Series	First Pass	Shell Type
<input checked="" type="checkbox"/>	2	1	1	Counter	E

Convert to Rigorous Model

You can replace any simple exchanger model by a fully rigorous model in your simulation defining a geometry by sizing or by direct specification via input or by importing a prepared file.

Size Exchanger Specify Geometry

Figure III 9:Fenêtre des paramètres de l'évaporateur

➤ Turbine

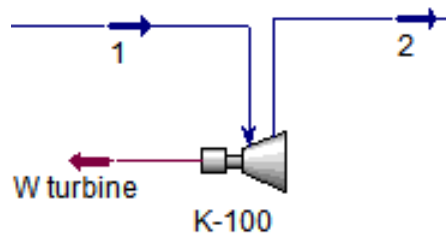


Figure III 10:Présentation de la turbine

On définit l'entrée, la sortie et l'énergie de la turbine.

L'entrée : 1 (fluide de travail -vapeur saturée)

La sortie: 2 (fluide de travail- vapeur surchauffé)

L'énergie :  $W_{Turbine}$  (énergie de la turbine)

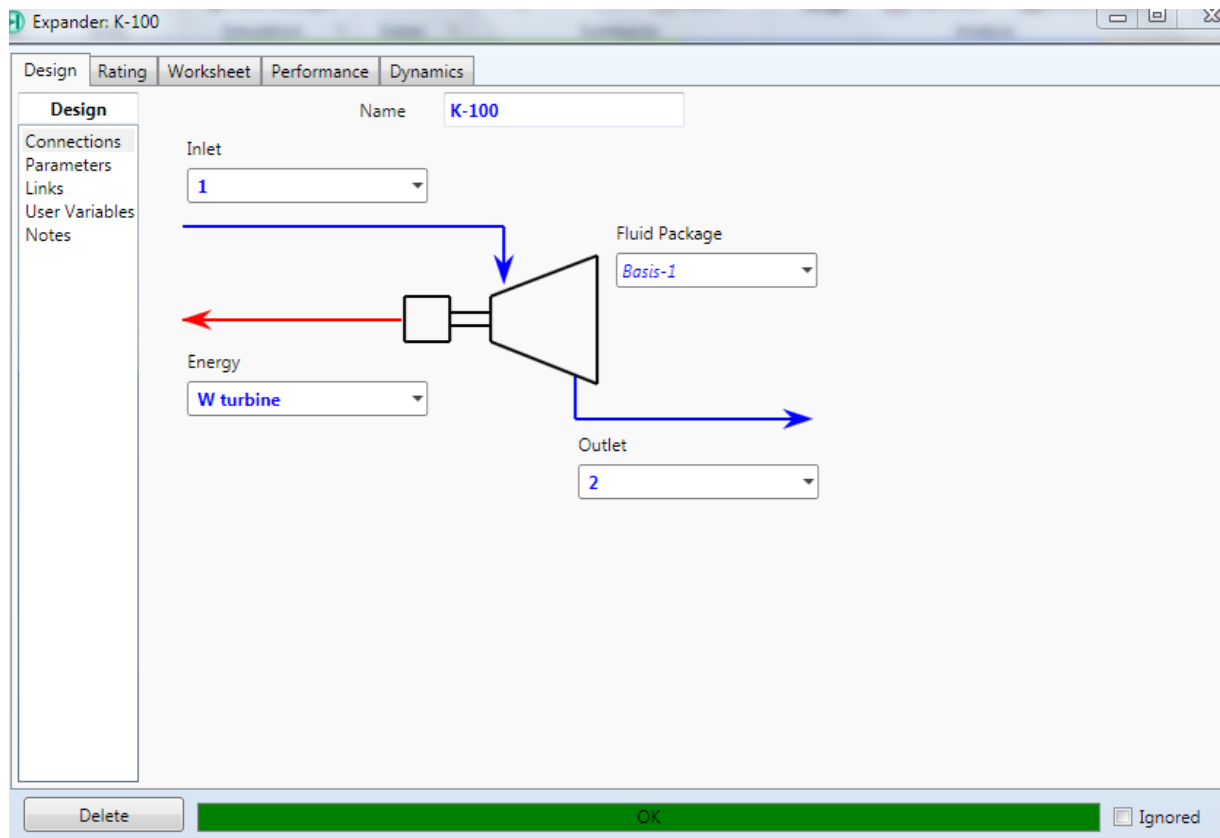


Figure III 11:Installation de la turbine

Dans les paramètres de la turbine, on définit le rendement isentropique de la turbine

Rendement isentropique :  $\eta_{is-t} = 0.85$

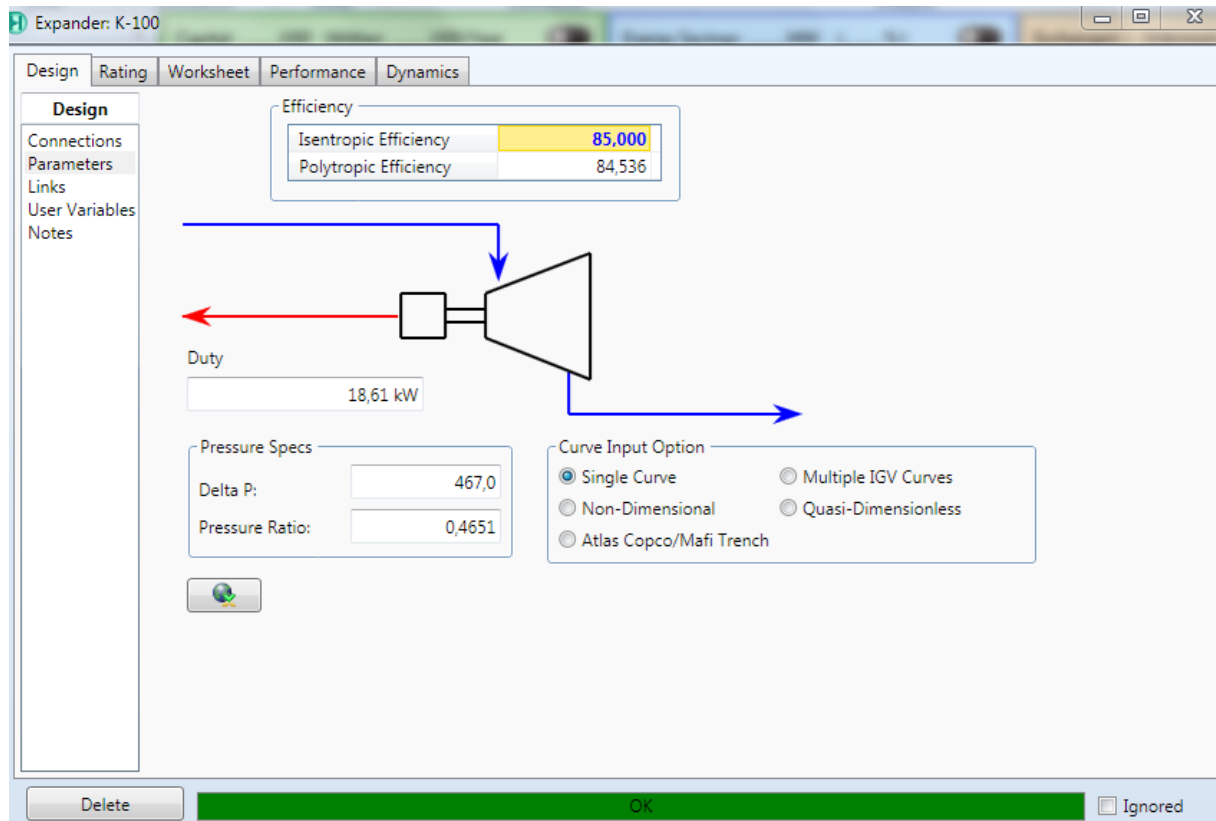


Figure III 12: Paramètre de la turbine

➤ Condenseur

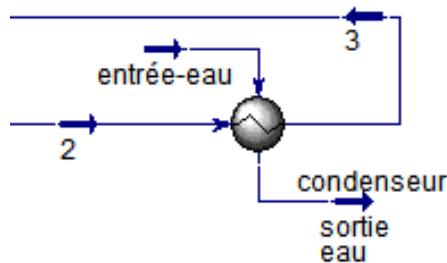
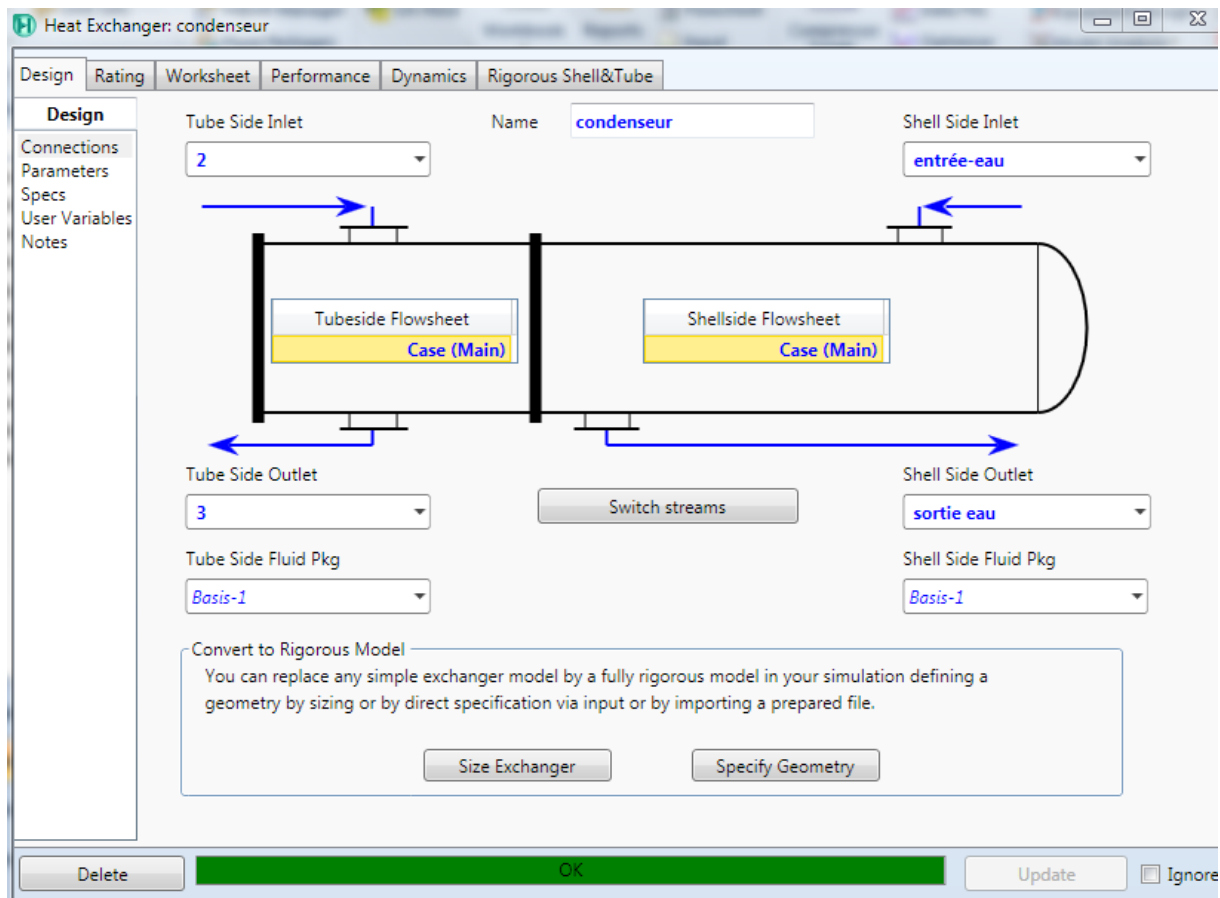


Figure III 13: Présentation du condenseur

On définit les entrées et les sorties dans le condenseur, où l'eau de refroidissement entre dans la calandre à une température de 20°C et ressort à 25 °C et le fluide de travail circule dans les tubes.



**Figure III 14:**Installation du condenseur

On définit les conditions et les paramètres du condenseur, comme indiqué dans les figures suivantes

Name	2	3	entrée-eau	sortie eau
Vapour	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000
Temperature [C]	38,09	30,00	20,00	25,00
Pressure [bar]	4,061	4,061	2,289e-002	2,289e-002
Molar Flow [kgmole/h]	44,88	44,88	19,74	19,74
Mass Flow [kg/s]	0,7246	0,7246	9,877e-002	9,877e-002
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	4,639	4,639	0,3563	0,3563
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-1,306e+005	-1,503e+005	-2,866e+005	-2,418e+005
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	171,5	106,6	52,40	205,2
Heat Flow [kJ/h]	-5,860e+006	-6,744e+006	-5,657e+006	-4,773e+006

Figure III 15:Fenêtre des conditions du condenseur

Heat Exchanger Model: **Simple End Point**

Heat Leak/Loss:  None  Extremes  Proportional

End Point Model

Overall UA [kJ/C-h]: **6,463e+004**

Specified Pressure Drop [bar]	SHELL-SIDE	TUBE-SIDE
	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>

Use Ft	Tube Passes	Shell Passes	Shells In Series	First Pass	Shell Type
<input checked="" type="checkbox"/>	2	1	1	Counter	E

Convert to Rigorous Model

You can replace any simple exchanger model by a fully rigorous model in your simulation defining a geometry by sizing or by direct specification via input or by importing a prepared file.

Buttons:

Figure III 16:Fenêtre des paramètres du condenseur

➤ Pompe

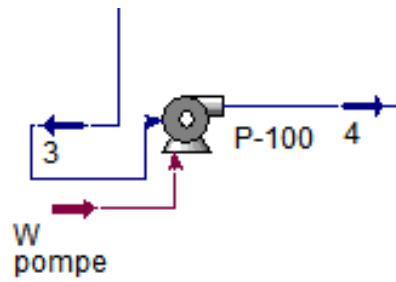


Figure III 17:Présentation de la pompe

On définit l'entrée, la sortie et l'énergie de la pompe.

L'entrée : 3 (la sortie du condenseur -liquide saturé)

La sortie : 4 (l'entrée du préchauffeur)

L'énergie : W pompe

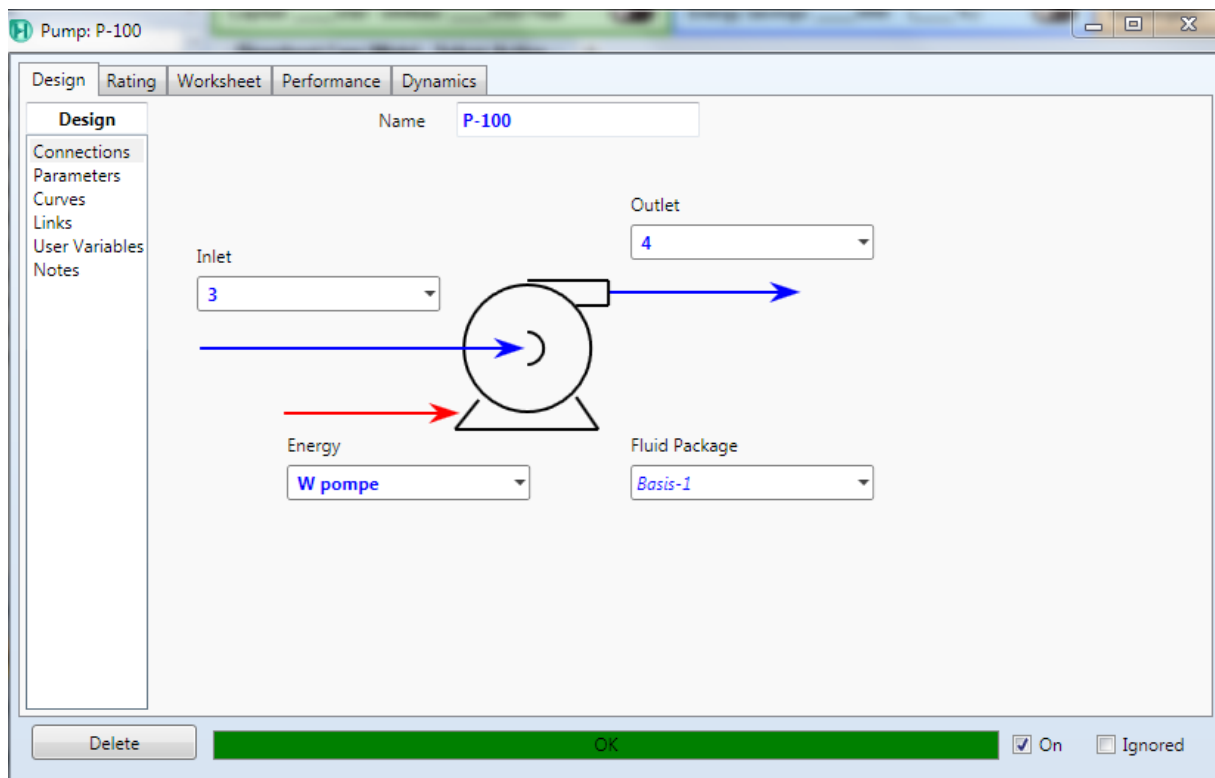


Figure III 18:Installation de la pompe

Dans paramètres on introduit la valeur du rendement isentropique  $\eta_{is-p}=0.65$

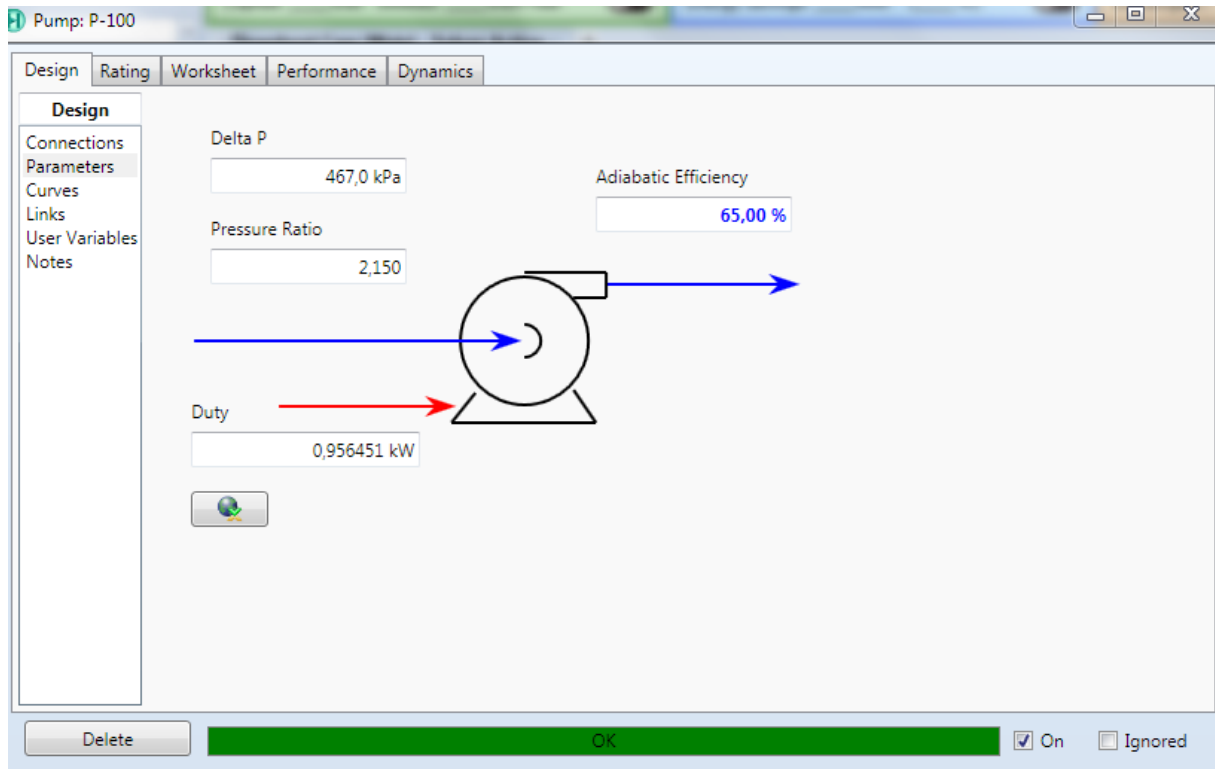


Figure III 19: Paramètre de la pompe

➤ Préchauffeur

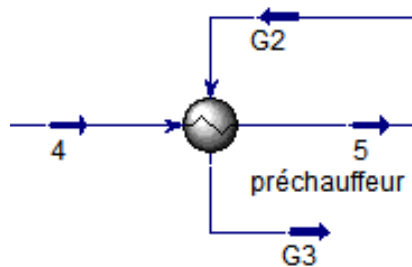


Figure III 20: Présentation du préchauffeur

On définit les entrées et les sorties de l'eau géothermale et du fluide de travail

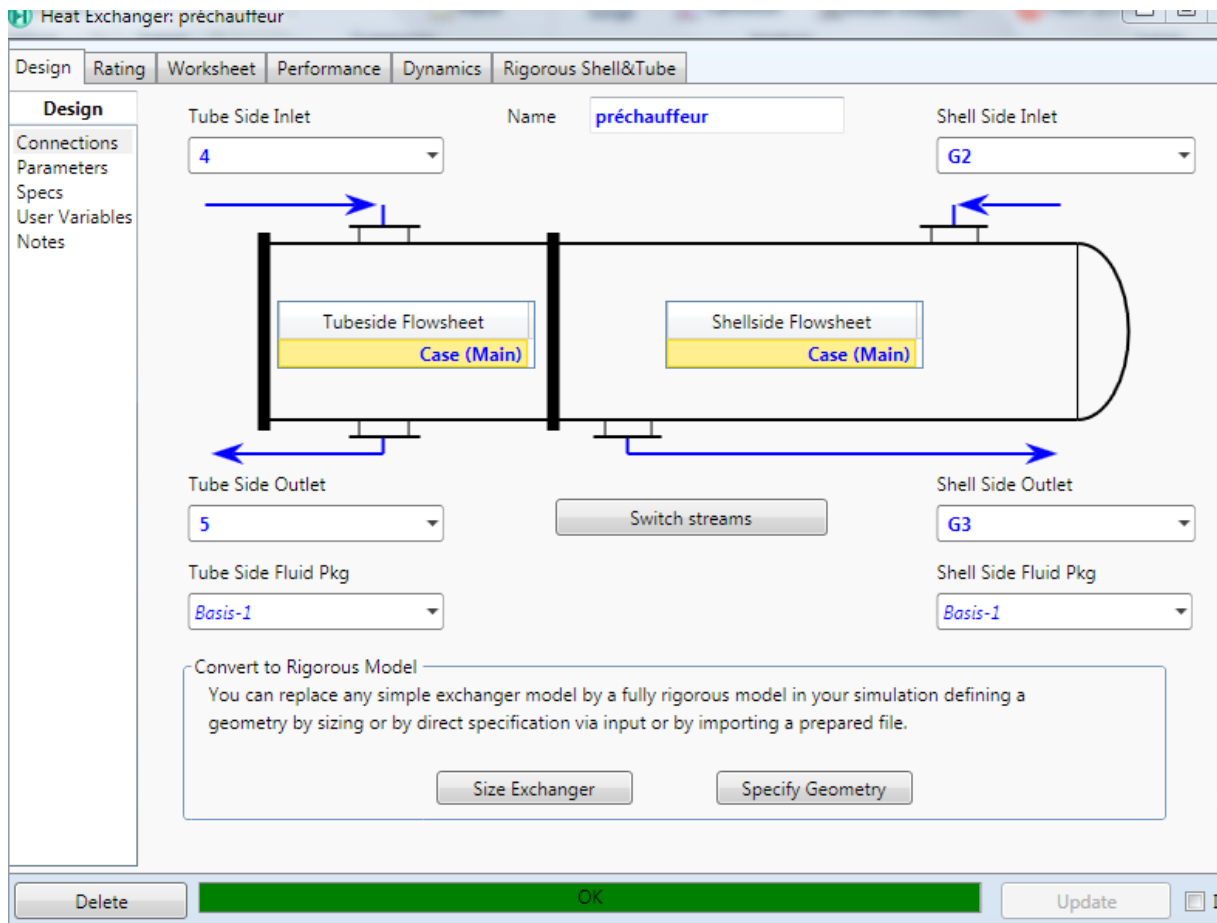


Figure III 21: Installation du préchauffeur

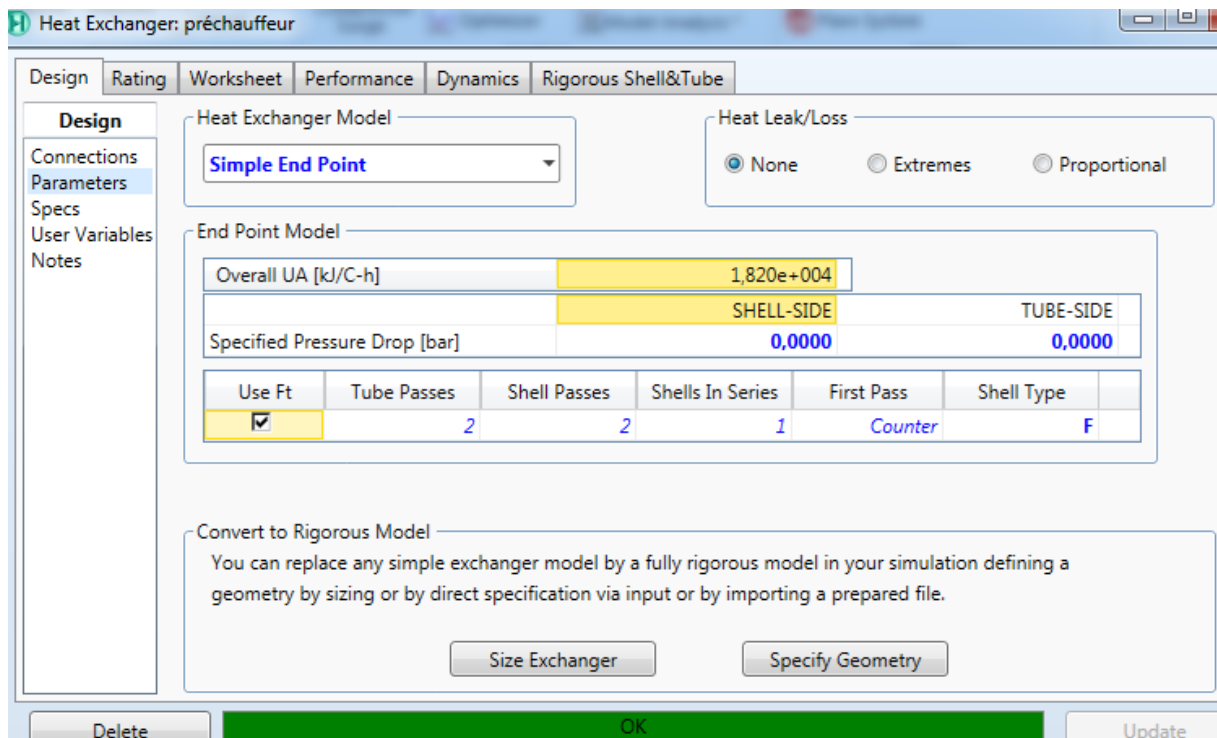


Figure III 22: Paramètre du préchauffeur

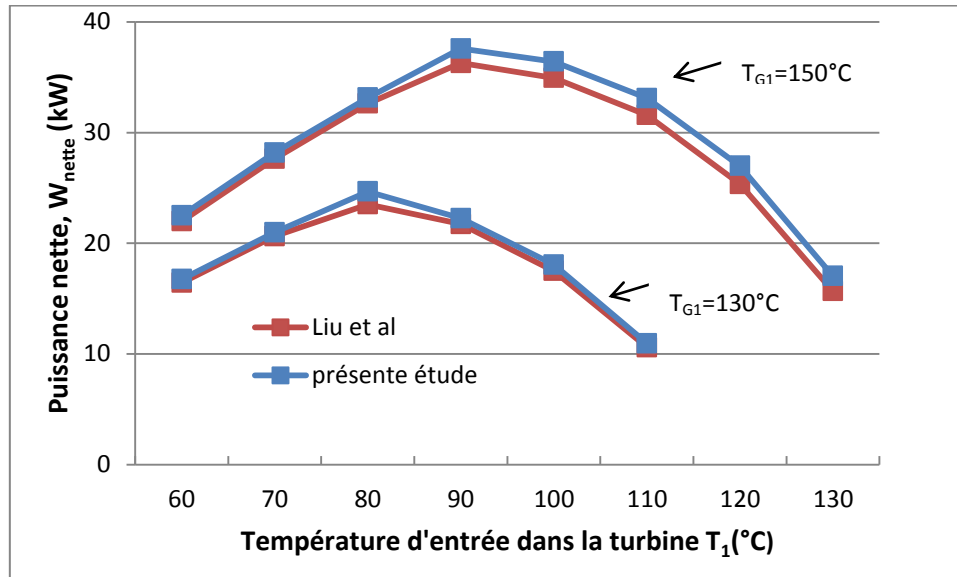
### III.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté le logiciel ASPEN HYSYS v10 qui a été utilisé pour simuler notre cas d'étude en l'occurrence le système ORC standard décrit dans le chapitre précédent. Nous avons expliqué les différentes étapes que nous avons suivies pour l'aboutissement de la simulation.

# Chapitre IV

## IV.1 Validation

Les résultats présentés dans les figures IV.1 comparent les valeurs obtenues de la puissance électrique nette générée par la turbine à celles fournies par les travaux de Liu et al [14] en fonction de la température du fluide frigorigène R-600 en entrée de la turbine.



**Figure IV 1** : Puissance électrique nette générée à différentes températures du R-600 en entrée de turbine pour une source géothermale à  $130^{\circ}\text{C}$  et  $150^{\circ}\text{C}$

Les résultats entre la simulation effectuée avec ASPEN HYSYS et les valeurs données par Liu et al.[14] sont proches. Les écarts étant faibles, nous considérons que nos résultats sont validés par rapport à la littérature.

IV.2 Température d'entrée en turbine

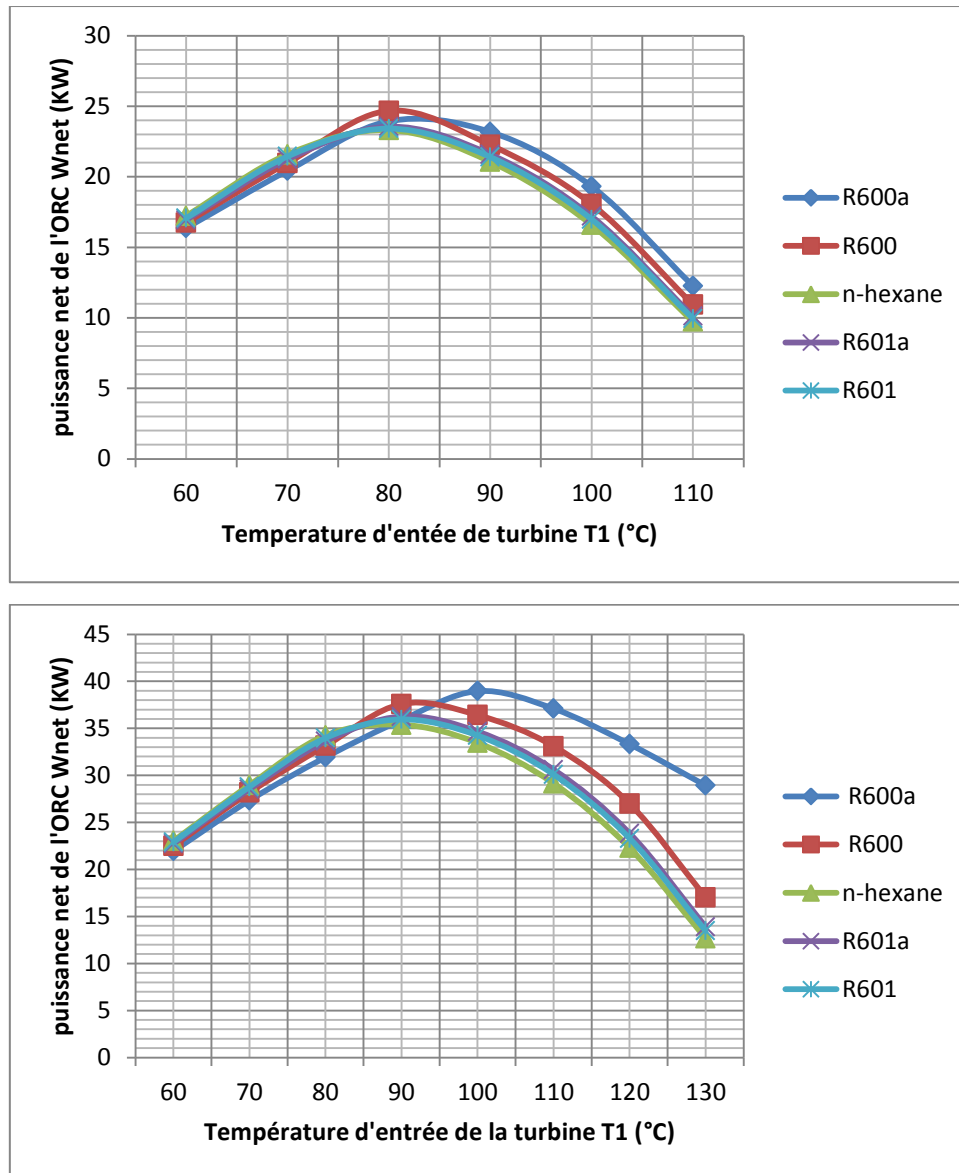


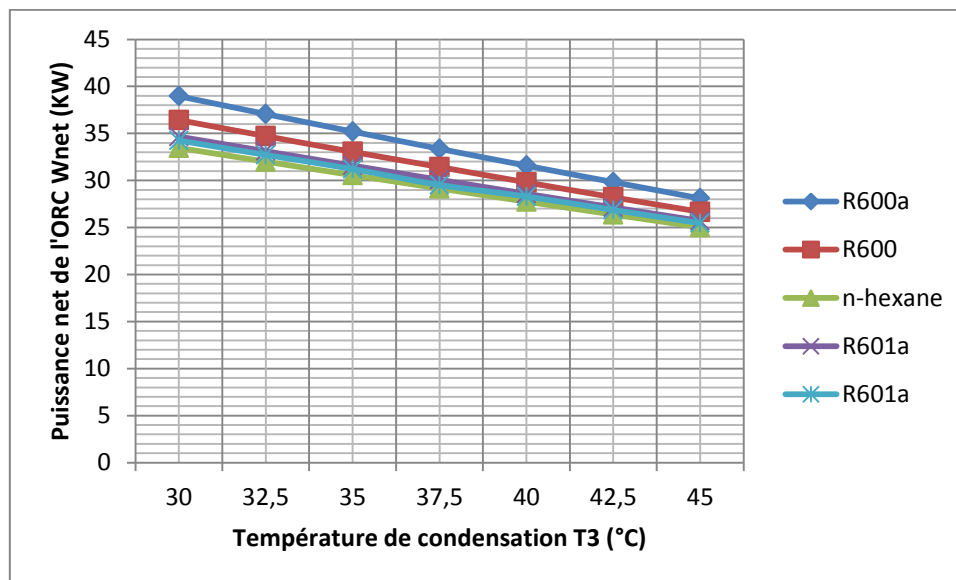
Figure IV 2: Le profil de variation de puissance net de l'ORC en fonction de la température d'entrée dans la turbine avec  $T_{GI}=150^{\circ}C, T_{GI}=130^{\circ}C$  et une température de condensation de  $30^{\circ}C$ .

La puissance nette du système ORC est calculée en utilisant l'équation (II.7) qui est le produit de la puissance nette spécifique et du débit du fluide de travail. La puissance nette du système ORC est représentée sur la figure IV.3 en fonction de la température d'entrée dans la turbine pour une source géothermale à  $130^{\circ}C$  et  $150^{\circ}C$  et une température de condensation de  $30^{\circ}C$  et cela pour différents fluides frigorigènes. Comme le montre la figure IV.3, les courbes obtenues peuvent être décomposées en deux parties. Dans la première partie (la partie ascendante), la température de réinjection du fluide géothermal est fixée à  $70^{\circ}C$  afin d'éviter

les problèmes d'encrassement dans l'échangeur de chaleur. Ainsi, l'augmentation de la température en entrée de turbine entraîne une augmentation de la puissance nette du système ORC. La valeur maximale de la puissance nette est obtenue pour une valeur de température d'entrée dans la turbine permettant d'obtenir le pincement minimal de température dans l'évaporateur ( $10^{\circ}\text{C}$ ) tout en gardant une température de réinjection de la source géothermale supérieure ou égale à  $70^{\circ}\text{C}$ . À partir de ce point, la température  $T_1$  devient trop importante pour permettre une réinjection de l'eau géothermale à  $70^{\circ}\text{C}$  (partie descendante des courbes) tout en respectant le pincement minimal de  $10^{\circ}\text{C}$ . La température de réinjection doit alors être augmentée de façon à toujours respecter la valeur minimale du pincement. La quantité de chaleur délivrée par la source diminue ce qui impose une diminution de la puissance nette.

### IV.3 Température de condensation

L'influence de la température de condensation sur la puissance nette du système ORC est illustrée dans la Figure IV.4 pour une température d'entrée d'eau géothermique de  $150^{\circ}\text{C}$  et une température en entrée de la turbine de  $100^{\circ}\text{C}$ . La température d'entrée de l'eau de refroidissement est de  $20^{\circ}\text{C}$  et la différence de température du point de pincement dans le condenseur est de  $5^{\circ}\text{C}$ . La température de condensation est liée à l'augmentation de la température de l'eau de refroidissement.



**Figure IV 3:** Le profil de variation de la puissance net du système ORC en fonction de température de condensation  $T_3$

La puissance nette diminue linéairement au fur à mesure que la température de condensation augmente comme le montre la figure IV.4, car la différence d'enthalpie dans la turbine diminue et le rendement du cycle diminue également. La puissance nette du système

ORC avec le fluide de travail R600a est la plus élevée parmi les cinq fluides de travail utilisés. La puissance nette est plus élevée pour une température de condensation plus basse et avec une augmentation de la température de l'eau de refroidissement la plus faible.

IV.4 Système ORC avec IHE

L'intégration d'un échangeur de chaleur de récupération peut améliorer le rendement thermique du cycle en récupérant une partie de la chaleur résiduelle de la vapeur surchauffée à la sortie de la turbine. Le système ORC avec un échangeur de chaleur interne (IHE) et le diagramme T-s sont illustrés dans la figure IV.1 (a, b).

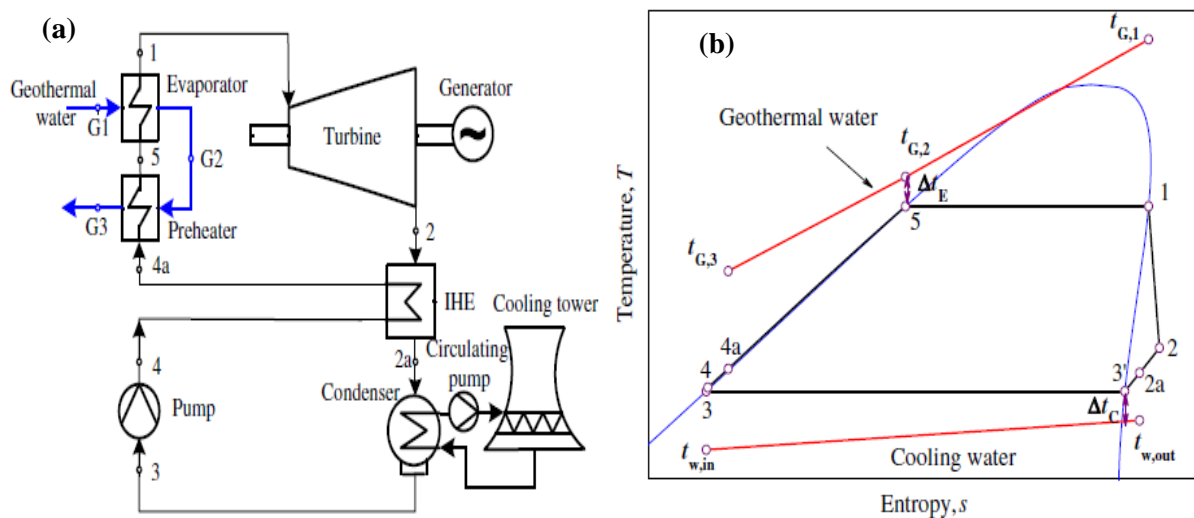


Figure IV 41 Schéma d'un (a) ORC avec IHE avec une tour de refroidissement (b) Cycle thermodynamique T-s

Les performances d'un système ORC standard et d'un système ORC avec IHE sont discutées ici en considérant un pincement de 5°C dans l'échangeur interne de récupération et une température de condensation égale à 30 °C. Le fluide de travail utilisé est le R601a et la température en entrée de la turbine  $T_1$  est réglée d'une façon pour avoir le maximum de puissance nette à la sortie.

La simulation est réalisée pour deux températures différentes de la source géothermale à savoir 110°C et 150°C, les résultats sont illustrés dans les tableaux ci-dessous :

- Système ORC standard
- ❖ Température de la source géothermal  $T_{G1} = 110^\circ\text{C}$

$T_1$ (°C)	$T_{G2}$ (°C)	$T_{G3}$ (°C)	$W_T$ (kW)	$W_P$ (kW)	$W_{net}$ (kW)	$\dot{m}_f$ (kg/s)	$h_1$ (kJ/kg)	$h_4$ (kJ/kg)	Rendement $\eta$ (%)
69.35	79.35	70.0	15.22	0.2616	13.908	0,4356	-2076	-2478	7,94

**Tableau IV.1** : résultats de la simulation d'un Système ORC standard à  $T_{G1} = 110^\circ\text{C}$

❖ Température de la source géothermal  $T_{G1} = 150^\circ\text{C}$

$T_1$ (°C)	$T_{G2}$ (°C)	$T_{G3}$ (°C)	$W_T$ (kW)	$W_P$ (kW)	$W_{net}$ (kW)	$\dot{m}_f$ (kg/s)	$h_1$ (kJ/kg)	$h_4$ (kJ/kg)	Rendement $\eta$ (%)
88.0	98.0	72.03	39.96	0.8856	36.317	0.8017	-2046	-2477	10,51

**Tableau IV.2** : résultats de la simulation d'un Système ORC standard à  $T_{G1} = 150^\circ\text{C}$

➤ **Système ORC avec IHE**

❖ Température de la source géothermal  $T_{G1} = 110^\circ\text{C}$

$T_1$ (°C)	$T_{G2}$ (°C)	$T_{G3}$ (°C)	$W_T$ (kW)	$W_P$ (kW)	$W_{net}$ (kW)	$\dot{m}_f$ (kg/s)	$h_1$ (kJ/kg)	$h_{4a}$ (kJ/kg)	Rendement $\eta$ (%)
67.54	77.54	70.0	15.34	0.2570	14.024	0,4587	-2078	-2460	8,0

**Tableau IV.3** : résultats de la simulation d'un Système ORC avec IHE à  $T_{G1} = 110^\circ\text{C}$

❖ Température de la source géothermal  $T_{G1} = 150^\circ\text{C}$

$T_1$ (°C)	$T_{G2}$ (°C)	$T_{G3}$ (°C)	$W_T$ (kW)	$W_P$ (kW)	$W_{net}$ (kW)	$\dot{m}_f$ (kg/s)	$h_1$ (kJ/kg)	$h_{4a}$ (kJ/kg)	Rendement $\eta$ (%)
88.0	98.0	78.24	39,93	0.8850	36.29	0.8011	-2046	-2443	11.41

**Tableau IV.4** : résultats de la simulation d'un Système ORC avec IHE à  $T_{G1} = 150^\circ\text{C}$ .

Le rendement des systèmes ORC sans et avec IHE est calculé en utilisant les équations (II.9) et (II.10), respectivement.

Pour une température de source géothermal égale à  $110^\circ\text{C}$  la température d'entrée du préchauffeur est améliorée dans l'IHE en récupérant la chaleur résiduelle de la vapeur surchauffée à la sortie de la turbine, ce qui conduit à une augmentation du débit du fluide de travail. Cependant, la température optimale en entrée de la turbine pour une puissance nette maximale du système ORC avec un IHE est inférieure à celle d'un système ORC standard. Ainsi, la puissance nette et le rendement du système sont légèrement augmentés.

Pour une température d'entrée d'eau géothermique plus élevée ( $150^{\circ}\text{C}$ ), la température en entrée de la turbine optimale pour une puissance nette maximale augmente, ce qui conduit à des températures de réinjection d'eau géothermique supérieures à  $70^{\circ}\text{C}$  pour les deux cas étudiés système ORC sans et avec IHE. Bien que IHE puisse augmenter la température d'entrée du préchauffeur ( $T_{4a}$ ), le changement de la température optimale en entrée de la turbine et le débit du fluide de travail est négligeable selon l'Eq. (II.2). Ainsi, le  $W_{\text{net}}$  du système ORC avec un IHE est presque égal à celui du système ORC standard comme mentionné par Yari. [21]

En comparant, la configuration du cycle ORC avec et sans récupérateur, on trouve que les rendements thermiques sont plus élevés pour les cycles équipés d'un récupérateur. Donc l'IHE améliore la performance du système ORC.

Propriétés thermodynamiques des fluides de travail et leurs diagrammes

substance	M/(g.mol <sup>-1</sup> ) [35]	T <sub>c</sub> /°C [35]	P <sub>c</sub> /MPa
<b>R600</b>	<b>58.122</b>	<b>151.975</b>	<b>3.796</b>
<b>R600a</b>	<b>58.122</b>	<b>134.66</b>	<b>3.629</b>
<b>R601</b>	<b>72.149</b>	<b>196.55</b>	<b>3.370</b>
<b>R601a</b>	<b>72.149</b>	<b>187.2</b>	<b>3.378</b>
<b>Hexane</b>	<b>86.175</b>	<b>234.67</b>	<b>3.034</b>

Tableau : propriétés thermodynamiques des cinq fluides de travail utilisés

[22] (35) Lemmon EW, Huber ML, McLinden MO. NIST standard reference database 23: reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP, version 8.0. Standard Reference Data Program. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology; 2007.

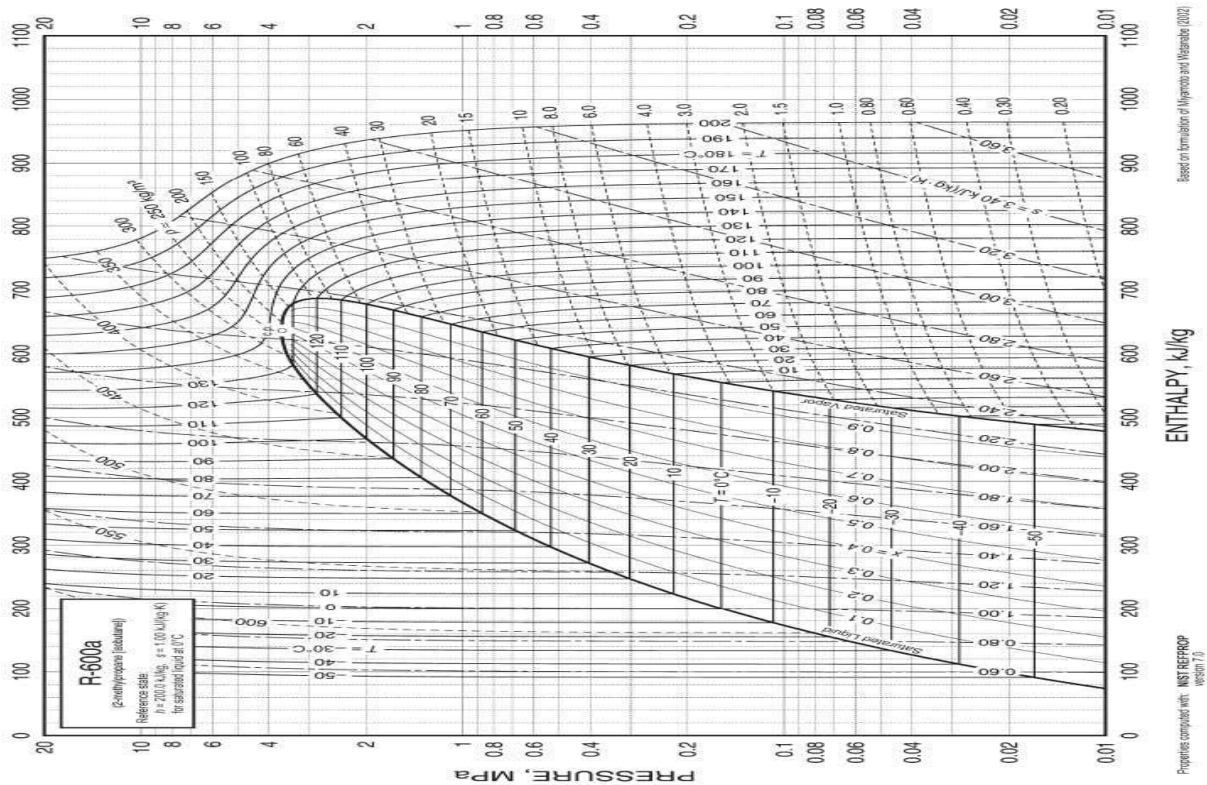


Figure 1:diagramme de R600a (isobutane)

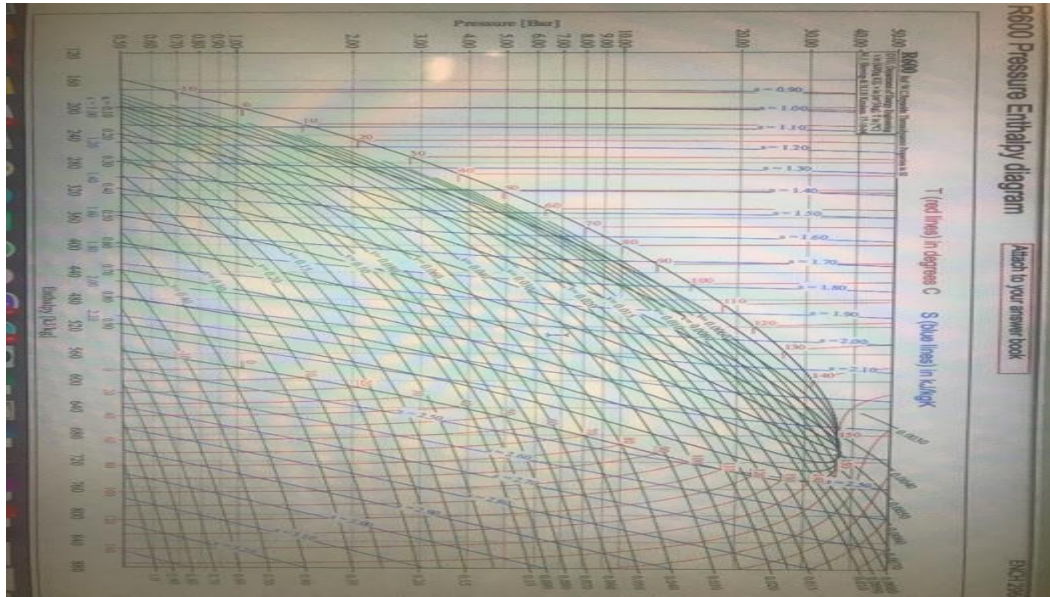


Figure 2:diagramme de R600 (butane)

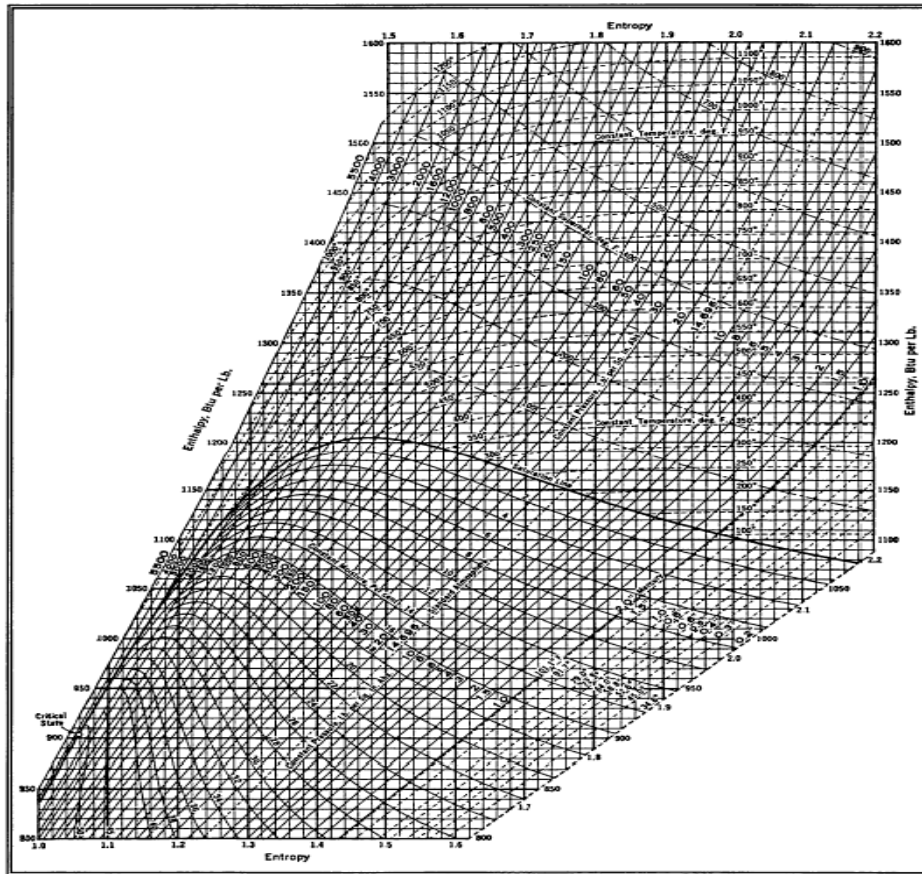


Figure 3:diagramme de n-hexane

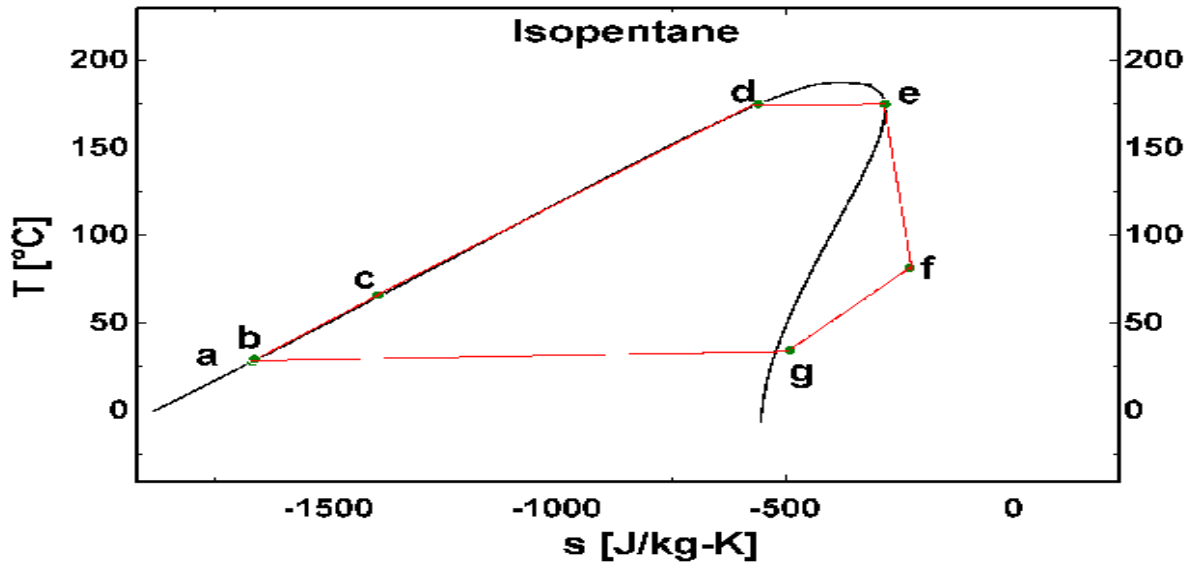


Figure 4: diagramme T-S de R601a (isopentane)

# Conclusion Générale

### Conclusion générale

L'énergie géothermique est peut-être moins connue que d'autres énergies renouvelables comme le solaire, l'éolien ou la biomasse, la géothermie présente pourtant de nombreux atouts. Ainsi, en termes d'applications, elle permet de couvrir une large gamme d'usages, telle que la production d'électricité, le chauffage et climatisation de l'habitat qu'il soit collectif ou individuel.

La valorisation de la ressource géothermique est une approche très prometteuse pour la production d'électricité. En effet divers systèmes énergétiques ont été développés en se basant sur les cycles organiques de Rankine, notons les cycles standard et les cycles avec échangeur de récupération de chaleur.

Notre projet a été basé sur l'étude de performance des cycles organiques de Rankine pour la valorisation de la chaleur fatale, dans le but de produire des puissances électriques maximales, pour une température de réinjection pas moins de 70°C afin d'éviter le phénomène d'encrassement dans les échangeurs de chaleur. À partir des résultats obtenus, les conclusions suivantes ont été tirées :

- Pour chaque fluide de travail, la puissance nette à la sortie augmente d'abord, puis diminue avec l'augmentation de la température en entrée de la turbine. La puissance maximale est produite par le R600a pour des températures d'entrée d'eau géothermique supérieures à 100 °C, suivi par le R600.
- La température de réinjection est supérieure à 70°C pour des températures d'évaporation plus élevées de façon à toujours respecter la valeur minimale du pincement dans l'évaporateur.
- L'utilisation d'un IHE réduit la température optimale en entrée de la turbine et augmente encore la puissance nette à sortie pour des températures d'eau géothermique plus basses avec une température de réinjection fixe.
- La puissance nette augmente au fur et à mesure que la température de condensation diminue pour tous les fluides de travail utilisés.

L'étude de ce projet nous ouvre des voies prometteuses pour l'avenir de l'utilisation de l'énergie géothermique et la valorisation du gisement géothermique en Algérie, ceci dans le domaine de production de l'électricité.

## Références

### Références

- [1] S. Ouali, A. Khellaf et K. Baddari. Etude des ressources géothermiques du sud algérien Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°3 (2007) 407 – 414.
- [2] ELBAZ YASSINE, et EL AOUAÏSSI ABDALLAH. Rapport sur : Centrale thermique. UNIVERSITE MOHAMED V, 2017.
- [3] KHERBACHE FATIMA ZOHRA. Mémoire de master en physique, Contribution à l'étude et dimensionnement d'une installation à base d'énergie géothermique pour la production d'énergie électrique. Université Abou - BekrBelkaid De Tlemcenfaculte Des Sciences,2015.
- [4] BachiriAbdelghani, Meloudj Moussa .mémoire de master, Etude d'une installation de chauffage géothermique, Université de M'sila, 2018.
- [5] S. OUALI, l'électricité géothermique, recherche et développement, Division Energie Solaire Thermique et Géothermie, CDER,2009.
- [6] S. Ouali, M.M. Hadjiat, A. Ait-Ouali, K. Salhi et A. Malek. Cartographie et caractérisation des ressources géothermiques de l'Algérie. Revue des Energies Renouvelables Vol. 21 N°1 (2018) 54 - 61
- [7] A. Fekraoui, et M. Abouriche, Algeria Country Update Report. In: Proceedings, the World Geothermal Congress, Vol. 1, 1995, 31.4.
- [8] M. Rezig. Etude Géothermique de l'Extrémité Est de l'Atlas Saharien. Rapport Interne, CDER, 1992.
- [9] M. Rezig. Etude Géothermique du Nord-Est de l'Algérie. DEA, Université des Sciences et des Techniques du Languedoc, Montpellier, 1991.
- [10] Eric Serge KENDA NITEDEM. Conception et dimensionnement d'une turbine de tesla de 250 w fonctionnant dans un cycle organique de rankine pour une centrale solaire a concentration. Mémoire de Master, Fondation 2iE et CIREA/FRANCE. 2012.
- [11] Dongxiang Wang, Xiang Ling, HaoPeng, Lin Liu, LanLan Tao. Efficiency and optimal performance evaluation of organic Rankine cycle for low grade waste heat power generation. Energy, 50, 343-352. doi: 10.1016/j.energy.2012.11.010.
- [12] Van Long LE. Étude de la faisabilité des cycles sous-critiques et supercritiques de Rankine pour la valorisation de rejets thermiques. Thèse de doctorat, l'Université de Lorraine. 2014.

- [13] Fabien MARTY. Optimisation de la structure globale des activités de surface d'une centrale géothermique de cogénération électricité/chaleur. Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour. 2017.
- [14] Liu, Q., Duan, Y. et Yang, Z. Performance analyses of geothermal organic Rankine cycles with selected hydrocarbon working fluids. Energy. Elsevier Ltd, 63,123-132. doi: 10.1016/j.energy.2013.10.035.
- [15] Grassiani M. Siliceous scaling aspects of geothermal power generation using binary cycle heat recovery. Proc 2000 World Geothermal Congress 2000: 3167-71.
- [16] Franco A, Villani M. Optimal design of binary cycle power plants for water dominated, medium-temperature geothermal fields. Geothermics 2009; 38:379-91.
- [17] Mago P, Chamra L, Srinivasan K, Somayaji C. An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids. Appl Therm Eng 2008; 28:998-1007.
- [18] Fodil Bacha Imene et Trad Hadjila. Etude et dimensionnement d'un échangeur de chaleur multitubulaire. Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, 2019.
- [19] Y. BOUDJEMAA. TP simulation des procédés industriels conformément programme officiel, 2017.
- [20] TOUAT Oussama et BELAIDI Fares. Analyse énergétique et exégétique d'une centrale à gaz. Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, 2018.
- [21] Yari M. Exergetic analysis of various types of geothermal power plants. Renew Energ 2010; 35(1):112-21.